

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Хакасский технический институт – филиал ФГАО ВО

«Сибирский федеральный университет»

институт

«Электроэнергетика»

кафедра

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

_____ Г. Н. Чистяков

подпись инициалы, фамилия

« _____ » _____ 20 ____ г.

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»

код – наименование направления

«Электропривод копающего механизма экскаватора с классической системой
подчиненного регулирования»

тема

Руководитель

подпись, дата

профессор, д.т.н.

должность, ученая степень

В.П.Кочетков

инициалы, фамилия

Выпускник

подпись, дата

В.В.Глухов

инициалы, фамилия

Нормоконтролер

подпись, дата

А. В.Коловский

инициалы, фамилия

Абакан 2017

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	7
1 Математическое описание объекта управления электропривода копающего механизма	12
1.1 Электрическая часть электропривода копающего механизма экскаватора	12
1.2 Механическая часть электропривода копающего механизма экскаватора	21
1.3 Двух - и одномассовая электромеханические системы копающего механизма.....	24
2 Синтез систем подчинённого регулирования	27
2.1 Трёхконтурная система подчинённого регулирования	27
2.2 Двухконтурная система подчинённого регулирования	35
2.3 Многоконтурные системы подчиненного регулирования	38
2.3.1 Четырехконтурная система подчиненного регулирования	42
2.3.2 Пятиконтурная система подчиненного регулирования	49
3 Исследование динамики электропривода с последовательной коррекцией координат	Ошибка! Закладка не определена.
Заключение	64
Список использованных источников	65
ПРИЛОЖЕНИЕ А	Ошибка! Закладка не определена.
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	Ошибка! Закладка не определена.
ПРИЛОЖЕНИЕ В	70
ПРИЛОЖЕНИЕ Г	71
ПРИЛОЖЕНИЕ Д	76

ВВЕДЕНИЕ

Экскаватор – это сложный механизм, который содержит многодвигательный привод по системе «генератор – двигатель» (далее Г-Д) с одним гонным двигателем асинхронным или синхронным, на валу с которым находятся генераторы напора, подъема и поворота, иногда на валу еще находится и возбудитель. Генератор напора питает двигатель напорного механизма, генератор подъема питает один или два двигателя подъема, число которых зависит от объема ковша экскаватора, генератор поворота, который питает два, либо три или четыре, причем каждый двигатель имеет соответствующий редуктор. Гонный двигатель, генераторы и возбудитель называют пятимашинным преобразовательным агрегатом. Система Г-Д на некоторых экскаваторах в России и за рубежом заменена на систему «тиристорный преобразователь – двигатель» (ТП-Д) главных приводов. В России на двадцатикубовых экскаваторах ЭКГ-20 внедрена система ТП-Д.

Привод переменного тока в России был только в опытном производстве разработан В.И. Ключевым с системой НПЧ (непосредственный преобразователь частоты). На Красноярском заводе тяжелых экскаваторов КЗТЭ, был разработан привод ПЧ-АД («преобразователь частоты – асинхронный двигатель») с девятифазными двигателями на экскаваторах ЭКГ-12,5.

В России на предприятиях Минцвета на экскаваторах ЭКГ-4,6 была внедрена система ТП-Д, а затем ее снова заменили на систему Г-Д. За рубежом небольшое число экскаваторов оснащены по системе ТП-Д и есть экскаваторы, оснащенные приводом переменного тока ПЧ-АД.

Рассмотрим экскаватор ЭКГ-8. Он имеет электрический привод полноповоротный. Предназначен для разработки и погрузки в транспортные средства или в отвал полезных ископаемых и пород вскрыши на открытых горных работах в черной и цветной металлургии, промышленности

строительных материалов, угольной промышленности, а также для выполнения больших объемов земляных работ в промышленном строительстве. Экскаватор ЭКГ-8И (Рисунок 1) состоит из рабочего оборудования, поворотной платформы с установленными на ней механизмами и ходовой тележки. Рабочее оборудование включает в себя стрелу, рукоять, ковш с подвеской, механизм открывания днища ковша и подвеску стрелы. Шарнирно-сочлененная стрела состоит из нижней и верхней секций сварной конструкции трубчатого сечения. Стрела воспринимает нагрузки от ковша с рукоятью и передает их на поворотную платформу и подвеску стрелы. Рукоять соединена со стрелой подвижно качающимся седловым подшипником. Ковш подвешен на подъемном канате, огибающем головные блоки на стреле. Подвеска стрелы шарнирно соединена с двуногой стойкой, передающей нагрузки от стрелы на поворотную платформу.

Поворотная платформа служит основанием для установленных на ней механизмов экскаватора и рабочего оборудования и составляет вместе с ними поворотную часть экскаватора. Рама поворотной платформы является одновременно корпусом противовеса экскаватора. На поворотной платформе установлены подъемная лебедка, механизм поворота, напорная лебедка, компрессор, кузов экскаватора, кабина машиниста с органами управления. Поворотная платформа опирается на роликовый круг, лежащий на кольцевом рельсе ходовой тележки, и соединяется с ходовой тележкой центральной цапфой. Ходовая тележка служит опорой всей вращающейся части экскаватора. Конструктивно ходовая тележка состоит из нижней рамы сварной конструкции, гусеничного хода, ходовых механизмов индивидуального привода гусениц и зубчатого венца с роликовым кругом. Напорный механизм служит для сообщения рукояти возвратно-поступательного движения. Механизм состоит из напорной лебедки и канатов. Лебедка имеет привод от электродвигателя, соединенного с редуктором фрикционной муфтой предельного момента. На выходные валы

редуктора насажены барабаны. Торможение напорного механизма при работе осуществляется противотоком. Для затормаживания механизма напора при остановке машины предусмотрен колодочный пневматический тормоз механизма подъема. Подъемный механизм служит для подъема и опускания ковша. Механизм состоит из подъемной лебедки и канатов. Лебедка приводится в движение двумя электродвигателями, соединенными с редуктором двумя упругими муфтами. На выходные валы редуктора насажены барабаны, на которых крепятся подъемные канаты.

Торможение подъемного механизма при работе осуществляется противотоком. Для затормаживания механизма подъема при остановке машины и обесточивании экскаватора предусмотрены два колодочных пневматических тормоза, связанных с тормозом механизма напора. Поворотный механизм экскаватора служит для вращения поворотной платформы с механизмами и рабочим оборудованием. Привод поворота осуществляется двумя одинаковыми механизмами, каждый из которых состоит из электродвигателя и редуктора. На верхнем коническом конце вала каждого электродвигателя установлен тормозной шкив для колодочного тормоза, предназначенного для затормаживания механизма поворота при передвижении экскаватора, на стоянке и при аварийном обесточивании, а на нижнем конце закреплена шестерня, являющаяся ведущей шестерней редуктора поворота. Консольный выходной вал редуктора заканчивается бегунковой шестерней, сцепленной с неподвижным зубчатым венцом, расположенным на нижней раме ходовой тележки экскаватора, Пневматическая схема служит для управления тормозами поворота, подъема и напора, обдува сжатым воздухом электрооборудования и механизмов, управления входной лестницей, подачи сигнала и привода различного пневматического инструмента. Воздух нагнетается компрессорной станцией, которая состоит из компрессора ВВ-О7/8 с приводом от электродвигателя и двух последовательно соединенных воздухохранилищ. Общий объем воздухохранилищ 47 л. На всасывающей патрубке компрессора установлен

воздушный фильтр. На нагнетательной трубе перед воздухоборником установлены маслоотделитель со спускным краном и обратный клапан.

Ходовой механизм служит для перемещения экскаватора ЭКГ-8 и состоит из электродвигателя, тормоза, редуктора и бортовых передач гусеничного хода. Электродвигатель установлен на корпусе редуктора, который прикреплен к гусеничной раме, и соединен с ним эластичной муфтой, служащей одновременно тормозным шкивом электромагнитного тормоза. Новым в практике отечественного и зарубежного экскаваторостроения для машин данного класса является установка отдельного привода на каждую гусеницу механизма хода. Зубчатые передачи всех механизмов заключены в пыленепроницаемые масляные ванны, а их валы смонтированы на подшипниках качения. Механизмы, расположенные на поворотной платформе (кроме напорного), закрыты металлическим кузовом, который снабжен принудительной вентиляцией и внутренним освещением. Поднятая над кузовом кабина машиниста обеспечивает хорошую обзорность, просторна, герметизирована, снабжена системой отопления, вентиляции и обогрева стекол. Экскаватор имеет ряд вспомогательных механизмов, обеспечивающих выполнение ремонтных и монтажных работ. В случае необходимости экскаватор ЭКГ-8И может быть переоборудован в экскаватор ЭКГ-4у или ЭКГ-6,3ус. Для этого необходимо только произвести замену рабочего оборудования (стрелы, рукояти, ковша, подвески стрелы). Основные узлы унифицированы с соответствующими узлами экскаватора ЭКГ-4у, ЭКГ-6,3ус. Каждый экскаватор снабжается комплектами инструмента и запасных частей. Масса инструмента и приспособлений 1040 кг, запасных частей (механической части) 7400 кг, запасного электрооборудования 1300 кг, противовеса (заводом не поставляется) 27-33 т.

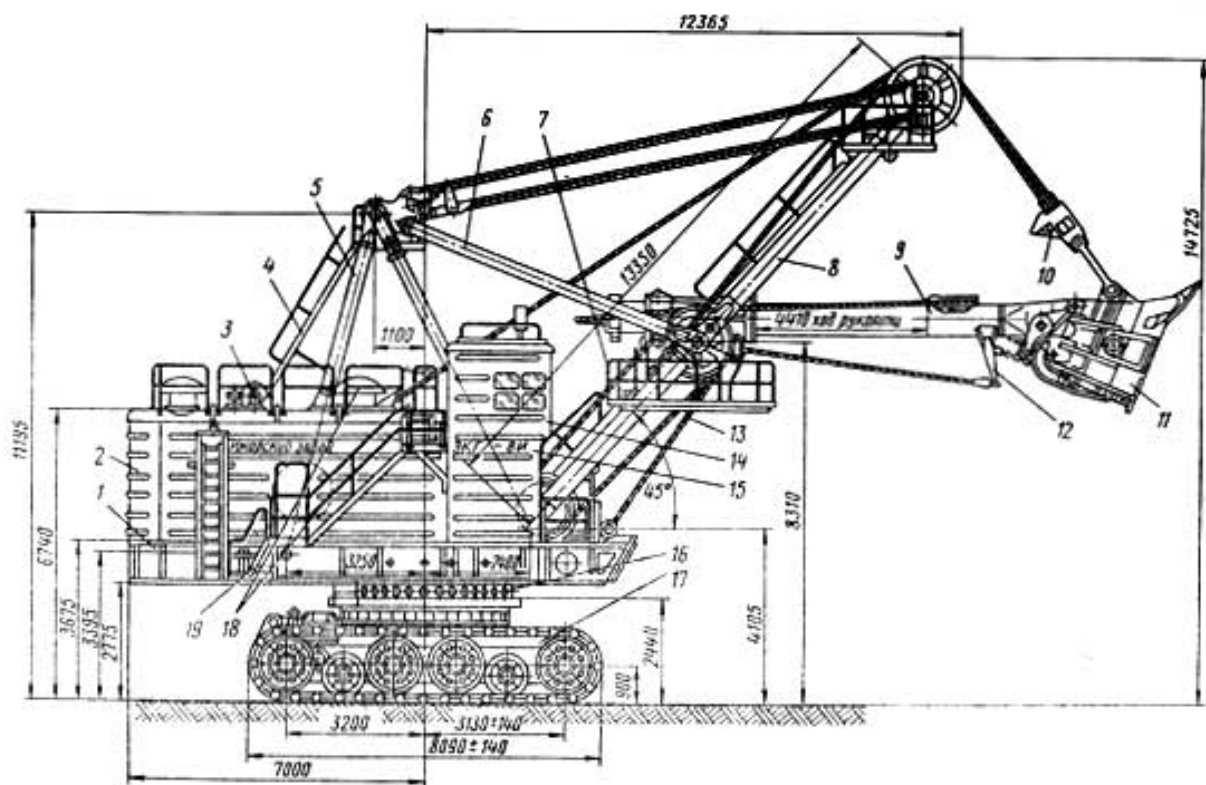
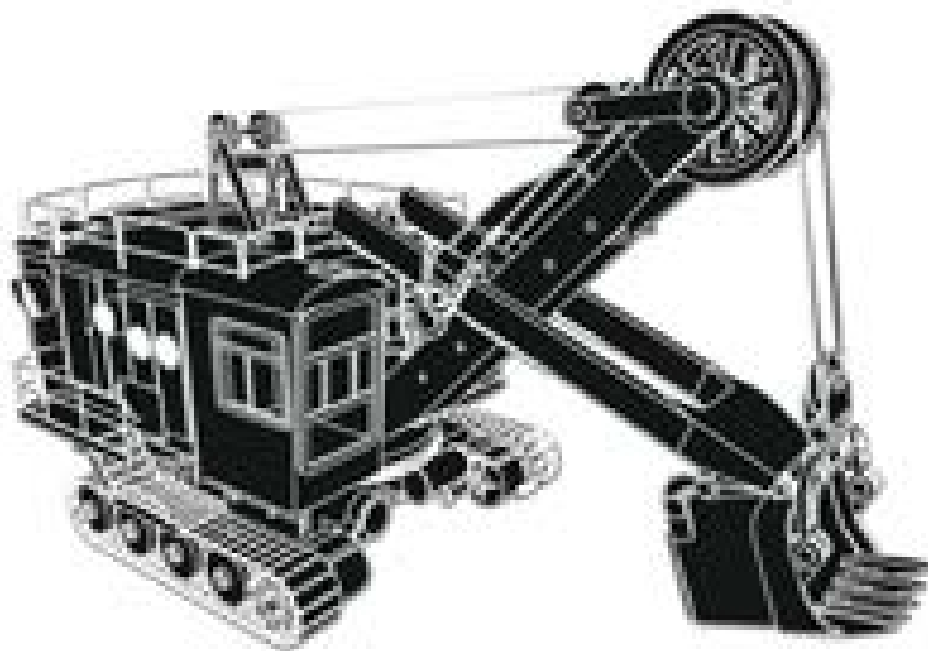


Рисунок 1 – Общий вид экскаватора ЭКГ-8

1 Математическое описание объекта управления электропривода копающего механизма

1.1 Электрическая часть электропривода копающего механизма экскаватора

Наиболее распространенным на экскаваторах в настоящее время является электропривод по системе «генератор-двигатель», где генератор является вращающимся преобразователем или управляемым преобразователем, преобразующим переменное напряжение сети в регулируемое по величине постоянное напряжение. [1]

Функциональная схема электропривода по системе «генератор-двигатель» изображена на рисунке 1.1.

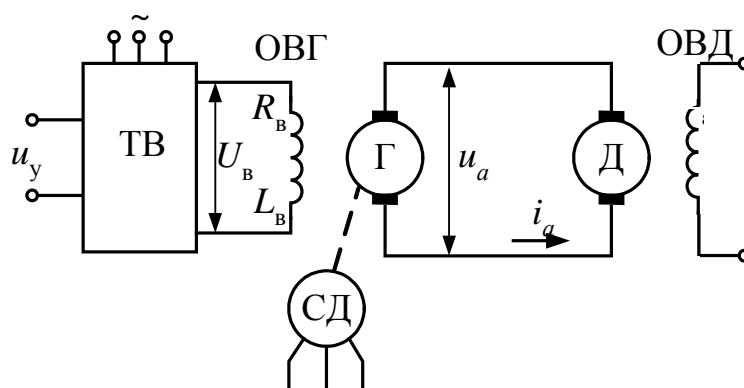


Рисунок 1.1 – Функциональная схема электропривода по системе «генератор-двигатель»

При разработке системы автоматического управления необходимо составление математической модели электропривода, начинающееся с разбиения функциональной схемы электропривода на структурные звенья, которое выполняют таким образом, чтобы структурное звено модели содержало не более одной постоянной времени.

Общепринятым является выделение следующих структурных звеньев электропривода рабочего органа экскаватора (рисунок 1.2):

- тиристорный возбудитель ТВ для питания обмотки возбуждения генератора;
- генератор Г, являющийся электромеханическим преобразователем, питающим электродвигатель Д;
- якорная цепь ЯЦ двигателя;
- вращающиеся массы якоря двигателя и жестко связанных с ним элементов – звено М1 («первая масса»);
- упругое звено УЗ, связывающее вал двигателя и рабочий орган;
- движущаяся масса ковша с грузом – звено М2 («вторая масса»).

В большинстве случаев используется следующая схема:

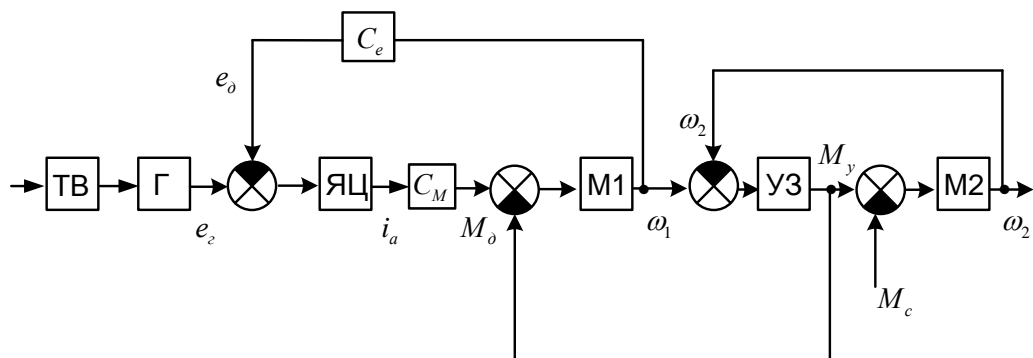


Рисунок 1.2 – Структурная схема объекта управления

Несмотря на то, что тиристорный возбудитель – дискретный элемент, при синтезе он принимается как апериодическое звено с передаточной функцией [2]:

$$W_{\text{ТВ}}(p) = \frac{K_{\text{В}}}{T_{\text{В}}p + 1} \quad (1.1)$$

где $K_B = K_f \frac{U_{BH}}{U_{UH}} = 10 \cdot \frac{38,5}{10} = 38,5$ – коэффициент передачи тиристорного возбудителя;

U_{BH} – номинальное напряжение обмотки возбуждения генератора;

U_{UH} – номинальное напряжение управления;

K_f – коэффициент форсировки генератора.

$$K_B = 10 \cdot \frac{38,5}{10} = 38,5$$

$T_B = T_\mu = 0,01$ с – постоянная времени тиристорного возбудителя.

$$W_{TB}(p) = \frac{K_B}{T_\mu \cdot p + 1} = \frac{38,5}{0,01 \cdot p + 1}$$

Для питания приводных двигателей применяют генератор. Якорь генератора жестко связан с ротором гонного двигателя, имеющего жесткую механическую характеристику. Это обеспечивает постоянство частоты вращения якоря. Поэтому механические свойства генератора не учитываются. Электрические свойства генератора, характеризующиеся индуктивностью L_{ag} и суммарным сопротивлением $R_{яг}$ якорной цепи генератора, рассматривают при составлении математического описания звена «якорная цепь».

Таким образом, при математическом описании генератора как звена экскаваторного электропривода наиболее важными являются свойства и параметры цепи возбуждения. Частота вращения якоря генератора практически постоянна и равна номинальной $\omega_{гн}$, поэтому ЭДС генератора e_r определяется только величиной магнитного потока Φ_r . Магнитный поток создается током возбуждения i_g . Связь между потоком и током возбуждения

нелинейная и задается характеристикой холостого хода. В некоторых случаях характеристика холостого хода генератора неизвестна, в этом случае может быть определен линейный коэффициент усиления генератора:

$$K_{\Gamma} = \frac{U_{\Gamma\text{н}}}{I_{\text{вн}}} = \frac{nU_{\text{дн}}}{I_{\text{вн}}} \quad (1.2)$$

где $U_{\Gamma\text{н}}$ – номинальное напряжение генератора;

$I_{\text{вн}}$ – номинальный ток возбуждения генератора;

n – число двигателей;

$U_{\text{дн}}$ – номинальное напряжение двигателя.

$$K_{\Gamma} = \frac{560}{29} = 19,3103$$

Динамические свойства генератора определяются уравнением баланса напряжений в цепи возбуждения генератора:

$$u_{\text{в}} = R_{\text{в}} i_{\text{в}} + L_{\text{в}} \frac{di_{\text{в}}}{dt} = R_{\text{в}} \left(1 + \frac{L_{\text{в}}}{R_{\text{в}}} p\right) i_{\text{в}}, \quad (1.3)$$

где $R_{\text{в}}$ – сопротивление обмотки возбуждения;

$L_{\text{в}}$ – индуктивность обмотки возбуждения;

Введем обозначение постоянной времени возбуждения генератора:

$$T_{\Gamma} = \frac{L_{\text{в}}}{R_{\text{в}}} \quad (1.4)$$

тогда:

$$i_B = \frac{1/R_B}{T_\Gamma p + 1} u_B \quad (1.5)$$

Таким образом, получаем передаточную функцию обмотки возбуждения генератора:

$$W_{\text{обг}}(p) = \frac{1/R_B}{T_\Gamma p + 1} \quad (1.6)$$

где R_B – сопротивление обмотки возбуждения генератора, может быть рассчитано следующим образом:

$$R_B = \frac{U_{\text{вн}}}{I_{\text{вн}}}, \quad (1.7)$$

где $U_{\text{вн}}$ – номинальное напряжение обмотки возбуждения генератора;

$I_{\text{вн}}$ – номинальный ток возбуждения генератора.

$$R_B = \frac{38,5}{29} = 1,3276 \text{ Ом}$$

Постоянная времени возбуждения генератора T_ϵ определяется из кривой намагничивания на линейном участке.

$$T_\epsilon = 2,0718 \text{ с}$$

$$W_{\text{огг}}(p) = \frac{1/1,3276}{2,0718 \cdot p + 1} = \frac{0,753}{2,0718 \cdot p + 1}$$

С учетом зависимостей (1.2) и (1.3) передаточная функция звена «генератор» имеет вид:

$$W_r(p) = \frac{K_z / R_b}{T_r p + 1} \quad (1.8)$$

$$W_r(p) = \frac{19,3103 / 1,3276}{2,0718p + 1} = \frac{14,5453}{2,0718p + 1}$$

Следующее структурное звено – якорная цепь – определяет электрические свойства схемы замещения (рисунок 1.3) генератора и приводного электродвигателя.

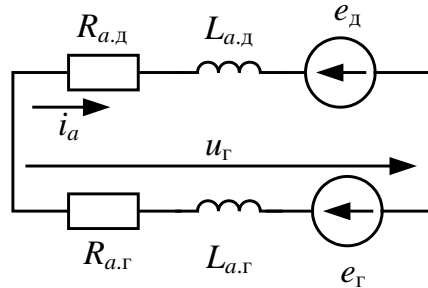


Рисунок 1.3 – Схема замещения якорной цепи силового модуля электропривода

Уравнение баланса напряжений якорной цепи имеет следующий вид:

$$e_r - e_d = i_a R_a + L_a \frac{di_a}{dt} \quad (1.9)$$

Из уравнения баланса напряжений якорной цепи (1.9) получаем:

$$e_r - e_d = R_a \left(1 + \frac{L_a}{R_a} p\right) i_a \quad (1.10)$$

Из уравнения (1.10) получаем передаточную функцию якорной цепи:

$$W_{\text{яц}}(p) = \frac{1/R_a}{T_a p + 1}, \quad (1.11)$$

где R_a – полное сопротивление якорной цепи;

$T_a = \frac{L_a}{R_a}$ – электромагнитная постоянная времени якорной цепи;

L_a – полная индуктивность якорной цепи.

Приведем расчет полных значений сопротивления и индуктивности для системы Г – Д.

Сопротивление якорной цепи

$$R_a = nR_{ад} + R_{аг}, \quad (1.12)$$

где n – число двигателей;

$R_{ад}$ – сопротивление якорной цепи двигателя;

$R_{аг}$ – сопротивление якорной цепи генератора.

Сопротивление якорной цепи двигателя

$$R_{ад} = 1,24(R_{яд} + R_{дпд}) + \frac{2}{I_{дн}}, \quad (1.13)$$

где $R_{яд}$ – сопротивление якоря двигателя;

$R_{днд}$ – сопротивление дополнительных полюсов двигателя;

$I_{дн}$ – номинальный ток якорной цепи двигателя.

$$R_{ад} = 1,24(0,0039 + 0,00325) + \frac{2}{760} = 0,01115 \text{ Ом}$$

Сопротивление якорной цепи генератора

$$R_{ar} = 1,24(R_{яг} + R_{дпг} + R_{ког}) + \frac{2}{I_{гн}}, \quad (1.14)$$

где $R_{яг}$ – сопротивление якоря генератора;

$R_{дпг}$ – сопротивление дополнительных полюсов генератора;

$R_{ког}$ – сопротивление компенсационной обмотки генератора;

$I_{гн}$ – номинальный ток якорной цепи генератора.

$$R_{ar} = 1,24(0,0075 + 0,00163 + 0,00516) + \frac{2}{895} = 0,0132 \text{ Ом}$$

$$R_a = 2 \cdot 0,01115 + 0,0132 = 0,0355 \text{ Ом}$$

Индуктивность якорной цепи

$$L_a = nL_{ад} + L_{аг}, \quad (1.15)$$

где $L_{ад}$ – индуктивность якорной цепи двигателя;

$L_{аг}$ – индуктивность якорной цепи генератора.

Индуктивность якорной цепи двигателя

$$L_{ад} = \frac{0,6U_{дн}}{p_n \omega_{дн} I_{дн}}, \quad (1.16)$$

где $U_{дн}$ – номинальное напряжение якорной цепи двигателя;

p_n – число полюсов;

$\omega_{дн} = \frac{2\pi n_{дн}}{60}$ – номинальная угловая скорость двигателя;

$n_{дн}$ – номинальная частота вращения двигателя.

$$\omega_{\text{дн}} = \frac{2\pi n_{\text{дн}}}{60} = \frac{2\pi \cdot 740}{60} = 77,4926 \text{ с}^{-1}$$

$$L_{\text{ад}} = \frac{0,6 \cdot 270}{4 \cdot 77,4926 \cdot 760} = 0,0011461 \text{ Гн}$$

Индуктивность якорной цепи генератора

$$L_{\text{ар}} = \frac{U_{\text{гн}}}{p_n \omega_{\text{гн}} I_{\text{гн}}}, \quad (1.17)$$

где $U_{\text{гн}}$ – номинальное напряжение якорной цепи генератора;

p_n – число полюсов;

$\omega_{\text{гн}} = \frac{2\pi n_{\text{гн}}}{60}$ – номинальная угловая скорость генератора;

$n_{\text{гн}}$ – номинальная частота вращения генератора.

$$\omega_{\text{гн}} = \frac{2\pi \cdot 1000}{60} = 104,72 \text{ с}^{-1}$$

$$L_{\text{ар}} = \frac{560}{4 \cdot 104,72 \cdot 895} = 0,0014937 \text{ Гн}$$

$$L_a = 2 \cdot 0,0011461 + 0,0014937 = 0,0037859 \text{ Гн}$$

$$T_a = \frac{0,0037859}{0,0355} = 0,1067 \text{ с}$$

$$W_{\text{яц}}(p) = \frac{1/0,0355}{0,1067 \cdot p + 1} = \frac{28,169}{0,1067 \cdot p + 1}$$

При постоянном потоке ЭДС двигателя пропорциональна скорости:

$$e_d = C_e \omega, \quad (1.18)$$

где C_e – электромагнитная конструктивная постоянная эквивалентного двигателя, которая вычисляется по формуле:

$$C_e = n \frac{U_{дн} - I_{дн} R_{ад}}{\omega_{дн}} \quad (1.19)$$

$$C_e = 2 \cdot \frac{270 - 760 \cdot 0,0011152}{77,4926} = 6,7497$$

1.2 Механическая часть электропривода копающего механизма экскаватора

Следующим структурным звеном является механическая часть двигателя. Выходной координатой структурного звена «якорная цепь» является ток якоря эквивалентного двигателя. Значение тока определяет момент, развиваемый двигателем:

$$M_d = k \Phi_{\partial} i_{ад} \quad (1.20)$$

или (при постоянном магнитном потоке)

$$M_d = C_m i_{ад}, \quad (1.21)$$

где C_m – электромеханическая конструктивная постоянная эквивалентного двигателя. При расчетах в системе СИ электромеханическая конструктивная

постоянная численно равна электромагнитной конструктивной постоянной двигателя $C_m = C_e = C$, где C – конструктивная постоянная эквивалентного двигателя.

Уравнение (1.21) можно представить в виде передаточной функции:

$$W_{cm}(p) = \frac{M_o(p)}{i_{ao}(p)} = C_m \quad (1.22)$$

Запишем основное уравнение динамики:

$$M_o - M_y = J_1 \frac{d\omega_1}{dt} \quad (1.23)$$

Уравнению (1.23) соответствует передаточная функция:

$$W_{m1}(p) = \frac{\omega_1(p)}{M_o(p) - M_y(p)} = \frac{1}{J_1 p}, \quad (1.24)$$

где M_y – приведенный к валу двигателя момент в упругой связи между первой и второй сосредоточенными массами;

J_1 – суммарный момент инерции якорей двигателей и жестко связанных с ними механизмов, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$, $J_1 = 39,1 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$.

$$W_{m1}(p) = \frac{1}{39,1 p}$$

Упругое звено передает движущий момент двигателя к рабочему органу.

Входной переменной структурного элемента «упругое звено» является разность угловой скорости вала двигателя ω_1 и приведенной к валу двигателя угловой скорости рабочего органа ω_2 . Между приведенными угловыми скоростями двигателя и рабочего органа всегда выполняется соотношение $\omega_{\partial H} = \omega_{1H} = \omega_{2H}$.

В области упругих деформаций справедлив закон Гука, на основании которого можно записать уравнения упругого звена:

$$\begin{cases} M_y = c_{12}(\varphi_1 - \varphi_2) + \beta_{вт}(\omega_1 - \omega_2), \\ \dot{\varphi}_1 = \omega_1, \\ \dot{\varphi}_2 = \omega_2. \end{cases} \quad (1.25)$$

где c_{12} – коэффициент крутильной жесткости упругого звена, $(H \cdot м) / рад$;

φ_1 и φ_2 – угловое перемещение первой и второй сосредоточенных масс;

$\beta_{вт}$ – коэффициент внутреннего демпфирования, $(H \cdot м \cdot с) / рад$.

В соответствии с системой (1.25) передаточная функция упругого звена равна:

$$W_{yz}(p) = \frac{M_y(p)}{\omega_1(p) - \omega_2(p)} = \frac{\beta_{вт}p + c_{12}}{p}, \quad (1.26)$$

где $c_{12} = 1554,6 (H \cdot м) / рад$

Коэффициент внутреннего демпфирования принимаем $\beta_{вт} = 0,05c_{12}$.

$$\beta_{вт} = 0,05 \cdot 1554,6 = 77,73$$

Уравнение движения второй сосредоточенной массы (ковш с рукоятью) имеет вид:

$$M_y - M_c = J_2 \frac{d\omega_2}{dt}, \quad (1.27)$$

где M_c – приведенный к валу двигателя момент сопротивления, приложенный к рабочему органу;

$H \cdot м$, J_2 – приведенный к валу двигателя момент инерции второй массы, $кг \cdot м^2$.

Передаточная функция звена равна:

$$W_{m2}(p) = \frac{\omega_2(p)}{M_y(p) - M_c(p)} = \frac{1}{J_2 p} \quad (1.28)$$

Приведенный к валу двигателя момент инерции второй массы $J_2 = 4,414 кг \cdot м^2$.

$$W_{m2}(p) = \frac{1}{4,414 p}$$

1.3 Двух - и одномассовая электромеханические системы копающего механизма экскаватора

Таким образом, получены передаточные функции структурных звеньев объекта управления. Объединяя передаточные функции, составим структурную схему двухмассовой электромеханической системы (рисунок 1.4) типа «генератор – двигатель».

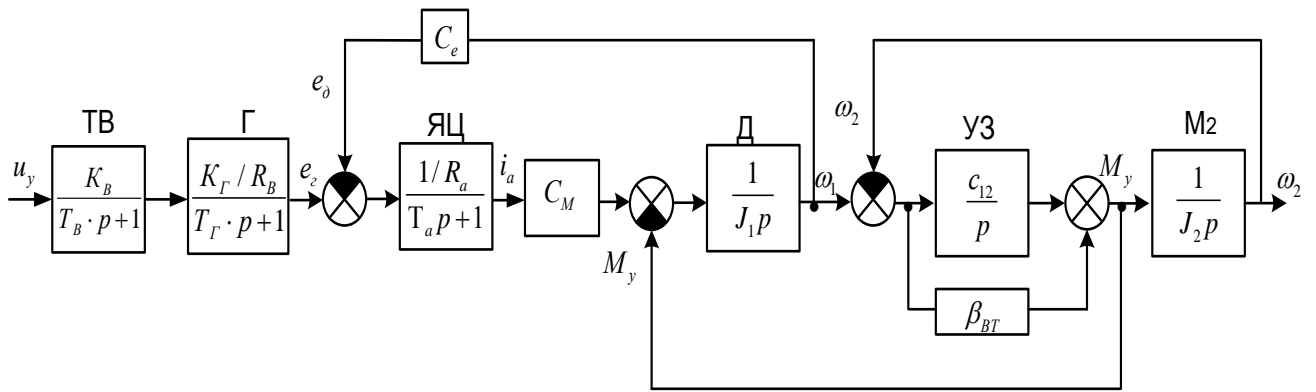


Рисунок 1.4 – Структурная схема двухмассовой электромеханической системы

Из уравнений (1.2), (1.3), (1.9), (1.18), (1.21), (1.23), (1.25), (1.27) получаем математическое описание двухмассовой электромеханической системы с приводом Г-Д в виде системы дифференциальных уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{di_{\delta}}{dt} = -\frac{R_{\delta}}{L_{\delta}} i_{\delta} + \frac{K_B}{L_{\delta}} u_y, \\ \frac{di_a}{dt} = \frac{K_{\Gamma}}{L_a} i_{\delta} - \frac{R_a}{L_a} i_a - \frac{C_e}{L_a} \omega_1, \\ \frac{d\omega_1}{dt} = \frac{C_M}{J_1} i_a - \frac{1}{J_1} M_y, \\ \frac{dM_y}{dt} = c_{12} (\omega_1 - \omega_2) + \beta_{ВТ} (\omega_1 - \omega_2), \\ \frac{d\omega_2}{dt} = \frac{1}{J_2} M_y. \end{array} \right. \quad (1.28)$$

Если пренебречь упругими связями в передачах, то получаем структурную схему одномассовой электромеханической системы (рисунок 1.5).

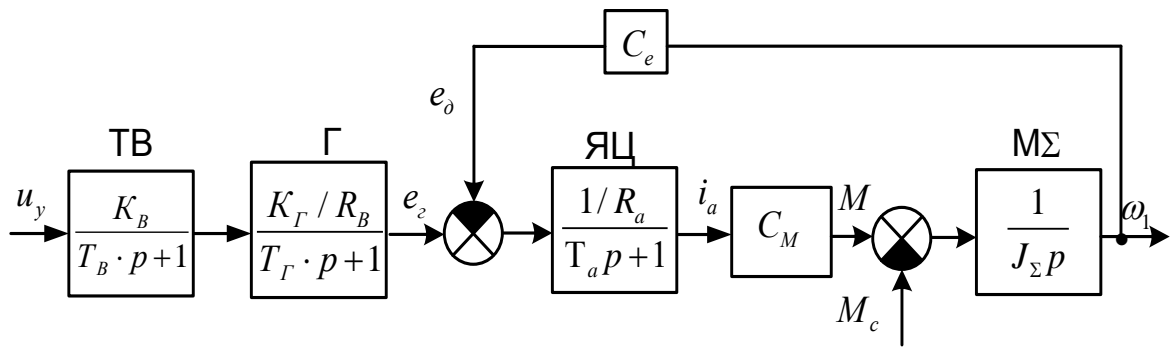


Рисунок 1.5 – Структурная схема одномассовой электромеханической системы

Математическое описание одномассовой электромеханической системы типа генератор – двигатель имеет вид:

$$\begin{cases} \frac{di_{\epsilon}}{dt} = -\frac{R_{\epsilon}}{L_{\epsilon}}i_{\epsilon} + \frac{K_B}{L_{\epsilon}}u_y \\ \frac{di_a}{dt} = \frac{K_{\Gamma}}{L_a}i_{\epsilon} - \frac{R_a}{L_a}i_a - \frac{C}{L_a}\omega_{\Sigma}, \\ \frac{d\omega_{\Sigma}}{dt} = \frac{1}{J_{\Sigma}}M \end{cases} \quad (1.29)$$

Таким образом, в зависимости от целей исследования и степени упрощения механизм подъема экскаватора может быть представлен различными структурными схемами, которые соответствуют математическим моделям одно- или двухмассовой систем. [3]

2 Синтез систем подчиненного регулирования

Главной задачей электропривода является быстроедействие при соответствующем характере переходного процесса. Этим требованиям отвечают системы подчиненного регулирования координат электропривода. Координаты корректируются последовательно, начиная с внутренних, при этом внутренний контур подчиняется внешнему. [4]

Рассмотрим классическую трехконтурную систему подчиненного регулирования и нетрадиционные двух-, четырех- и пятиконтурные системы подчиненного регулирования.

2.1 Трехконтурная система подчиненного регулирования

Классической является трехконтурная система подчиненного регулирования тока возбуждения, тока якорной цепи и скорости двигателя, применяемая к одномассовому объекту регулирования, представленная на рисунке 2.1. Она является классической, т.к. каждая постоянная времени компенсируется отдельным регулятором.

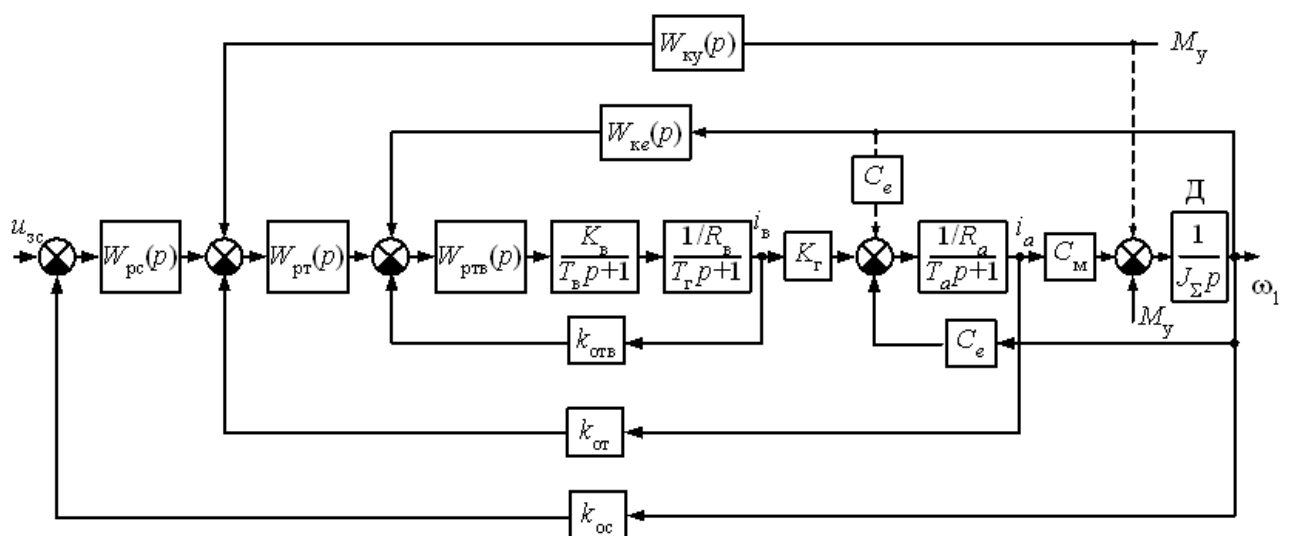


Рисунок 2.1 – Структурная схема трехконтурной системы подчиненного регулирования

а) Контур тока возбуждения

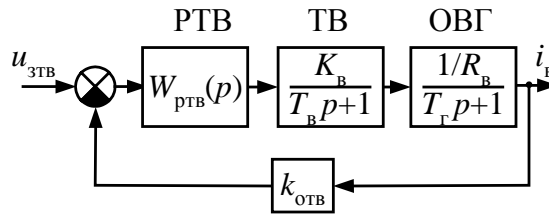


Рисунок 2.2 – Структурная схема контура тока возбуждения

Обозначим передаточную функцию регулятора тока возбуждения $W_{рТВ}(p)$. Некомпенсируемую постоянную времени принимаем равной постоянной времени возбудителя, т.е. $T_{\mu}=T_{\text{Б}}=0,01\text{с}$, что справедливо при безинерционном датчике и регуляторе.

Передаточная функция разомкнутого контура тока возбуждения

$$W_{\text{раз.тв}}(p) = W_{рТВ}(p)W_{\text{ТВ}}(p)W_{\text{ОБГ}}(p)k_{\text{ОТВ}} = W_{рТВ}(p)\frac{K_{\text{Б}}}{T_{\mu}p+1}\frac{1/R_{\text{Б}}}{T_{\Gamma}p+1}k_{\text{ОТВ}}, \quad (2.1)$$

где $k_{\text{отв}} = \frac{U_{\text{зТВ}}}{I_{\text{вн}}} = \frac{10}{29} = 0,3448$ – коэффициент обратной связи по току возбуждения;

$U_{\text{зТВ}}$ – напряжение задания по току возбуждения, равное номинальному напряжению управления;

$I_{\text{вн}}$ – номинальный ток возбуждения генератора.

Желаемая передаточная функция разомкнутого контура

$$W_{\text{раз.тв}}^{\text{ж}}(p) = \frac{1}{2T_{\mu}p(T_{\mu}p+1)} \quad (2.2)$$

Приравниваем желаемую и реальную передаточные функции разомкнутого контура

$$\frac{1}{2T_{\mu}p(T_{\mu}p+1)} = W_{\text{рТВ}}(p) \frac{K_{\text{Б}}}{T_{\mu}p+1} \frac{1/R_{\text{Б}}}{T_{\Gamma}p+1} k_{\text{отв}} \quad (2.3)$$

Сократив обе части на $(T_{\mu}p+1)$, находим передаточную функцию регулятора

$$W_{\text{рТВ}}(p) = \frac{R_{\text{Б}}(T_{\Gamma}p+1)}{2T_{\mu}K_{\text{Б}}k_{\text{отв}}p} = \frac{R_{\text{Б}}T_{\Gamma}}{2T_{\mu}K_{\text{Б}}k_{\text{отв}}} + \frac{R_{\text{Б}}}{2T_{\mu}K_{\text{Б}}k_{\text{отв}}p} = \underbrace{\frac{T_{\Gamma}}{T_{\text{и1}}}}_{\text{П}} + \underbrace{\frac{1}{T_{\text{и1}}}}_{\text{И}} \frac{1}{p}, \quad (2.4)$$

$$\text{где } T_{\text{и1}} = 2T_{\mu}K_{\text{Б}}k_{\text{отв}} / R_{\text{Б}} = \frac{0,02 \cdot 38,5 \cdot 0,3448}{1,3276} = 0,2 \text{ с.}$$

$$W_{\text{рТВ}}(p) = \frac{2,0718}{0,2} + \frac{1}{0,2} \cdot \frac{1}{p} = 10,359 + 5 \frac{1}{p}$$

Полученный регулятор пропорционально-интегральный (ПИ-регулятор).

Передаточная функция замкнутого контура тока возбуждения:

$$W_{\text{зКТВ}}(p) = \frac{W_{\text{рТВ}}(p)W_{\text{ТВ}}(p)W_{\text{ОВГ}}(p)}{1 + W_{\text{рТВ}}(p)W_{\text{ТВ}}(p)W_{\text{ОВГ}}(p)k_{\text{отв}}} \quad (2.5)$$

$$W_{\text{зКТВ}}(p) = \frac{1/k_{\text{отв}}}{2T_{\mu}p(T_{\mu}p+1)+1} \approx \frac{1/k_{\text{отв}}}{2T_{\mu}p+1} \quad (2.6)$$

$$W_{\text{зКТВ}}(p) = \frac{1/0,3448}{2 \cdot 0,01p+1} = \frac{2,9}{0,02p+1}$$

Обозначим $2T_{\mu}=T_{\mu2}=0,02$ с. – некомпенсируемые постоянные времени второго контура.

б) Контур тока якорной цепи

Структурная схема контура тока якорной цепи представлена на рисунке 2.3.

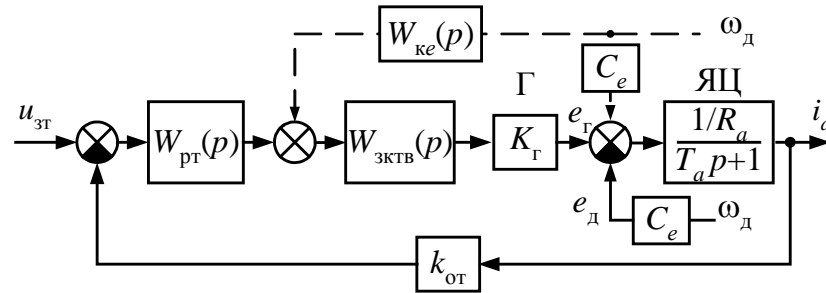


Рисунок 2.3 – Структурная схема контура тока якорной цепи

Для синтеза регулятора тока пренебрегаем обратной связью по ЭДС двигателя (в дальнейшем мы учтем ее действие при помощи коррекции по ЭДС), тогда передаточная функция разомкнутого контура

$$W_{\text{раз.тя}}(p) = W_{\text{рГ}}(p) W_{\text{зКТВ}}(p) W_{\text{яц}}(p) K_{\text{Г}} k_{\text{от}}, \quad (2.7)$$

где $k_{\text{от}} = \frac{U_{\text{зт}}}{I_{\text{стоп}}} = \frac{10}{1520} = 0,00658$ – коэффициент обратной связи по току якорной цепи;

$U_{\text{зт}}$ – напряжение задания по току якорной цепи, равное номинальному напряжению управления;

$I_{\text{стоп}}$ – стопорный ток якоря двигателя.

Желаемая передаточная функция разомкнутого контура

$$W_{\text{раз.тя}}^{\text{ж}}(p) = \frac{1}{2T_{\mu 2} p (T_{\mu 2} p + 1)} \quad (2.8)$$

Приравниваем желаемую и реальную передаточные функции разомкнутого контура

$$\frac{1}{2T_{\mu 2}p(T_{\mu 2}p+1)} = W_{\text{рт}}(p) \frac{1/R_a}{T_ap+1} \frac{1/k_{\text{отв}}}{T_{\mu 2}p+1} K_{\Gamma} k_{\text{от}} \quad (2.9)$$

Находим передаточную функцию регулятора

$$W_{\text{рт}}(p) = \frac{k_{\text{отв}} R_a (T_a p + 1)}{2T_{\mu 2} K_{\Gamma} k_{\text{от}} p} = \underbrace{\frac{T_a}{T_{\mu 2}}}_{\Pi} + \underbrace{\frac{1}{T_{\mu 2}}}_{\text{И}} \frac{1}{p}, \quad (2.10)$$

$$\text{где } T_{\mu 2} = 2T_{\mu 2} K_{\Gamma} k_{\text{от}} / R_a k_{\text{отв}} = \frac{2 \cdot 0,02 \cdot 19,3103 \cdot 0,00658}{0,0355 \cdot 0,3448} = 0,4152 \text{ с.}$$

$$W_{\text{рт}}(p) = \frac{0,1067}{0,4152} + \frac{1}{0,4152} \frac{1}{p} = 0,257 + 2,408 \frac{1}{p}$$

Полученный регулятор пропорционально-интегральный (ПИ-регулятор).

Передаточная функция замкнутого контура

$$W_{\text{зктя}}(p) = \frac{W_{\text{рт}}(p)W_{\text{яц}}(p)W_{\text{зктв}}(p)K_{\Gamma}}{1 + W_{\text{рт}}(p)W_{\text{яц}}(p)W_{\text{зктв}}(p)K_{\Gamma}k_{\text{от}}} = \frac{1/k_{\text{от}}}{2T_{\mu 2}p(T_{\mu 2}p+1)+1} \approx \frac{1/k_{\text{от}}}{2T_{\mu 2}p+1} \quad (2.11)$$

$$W_{\text{зктя}}(p) = \frac{1/0,00658}{2 \cdot 0,02p+1} = \frac{151,976}{0,04p+1}.$$

Обозначим $2T_{\mu 2}=T_{\mu 3}=0,04 \text{ с.}$

в) Контур скорости

В одномассовой системе нет сумматора 2. А т.к. результаты синтеза одномассовой системы мы затем распространяем на двухмассовую электромеханическую систему, то фактически существует внутреннее возмущающее воздействие по упругому моменту. Им при синтезе регулятора скорости мы пренебрегаем и в дальнейшем должны учесть при помощи коррекции по упругому моменту.

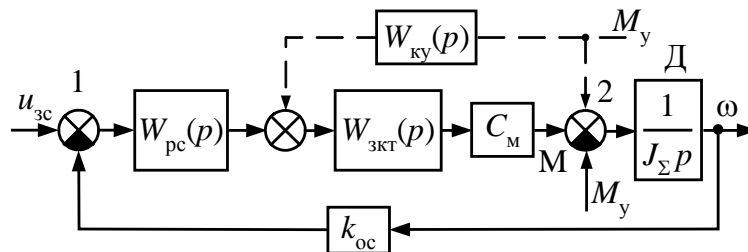


Рисунок 2.4 – Структурная схема контура скорости

K_{oc} – коэффициент обратной связи по угловой скорости двигателя,

$$K_{oc} = \frac{U_{3c}}{\omega_{дн}} = \frac{10}{77,4926} = 0,129;$$

U_{3c} – напряжение задания по скорости двигателя, равное номинальному напряжению управления;

$\omega_{дн}$ – номинальная угловая скорость двигателя.

Передаточная функция разомкнутого контура скорости

$$W_{раз.с}(p) = W_{рс}(p)W_{д}(p)W_{зкт}(p)k_{oc} \quad (2.12)$$

Желаемая передаточная функция разомкнутого контура

$$W_{раз.с}^ж(p) = \frac{1}{2T_{\mu 3}p(T_{\mu 3}p + 1)} \quad (2.13)$$

Приравниваем желаемую и реальную передаточные функции разомкнутого контура

$$\frac{1}{2T_{\mu 3}p(T_{\mu 3}p+1)} = W_{pc}(p) \frac{C_{ms}}{J_{\Sigma}p} \frac{1/k_{от}}{T_{\mu 3}p+1} k_{oc} \quad (2.14)$$

Находим передаточную функцию регулятора

$$W_{pc}(p) = \frac{k_{от}J_{\Sigma}}{2T_{\mu 3}C_{ms}k_{oc}} = k_{pc} \quad (2.15)$$

$$W_{pc}(p) = \frac{0,00658 \cdot 43,514}{2 \cdot 0,04 \cdot 6,7497 \cdot 0,129} = 4,11$$

Полученный регулятор пропорциональный (П-регулятор).

Передаточная функция замкнутого контура скорости

$$W_{зкс}(p) = \frac{W_{pc}(p)W_d(p)W_{зкт}(p)}{1 + W_{pc}(p)W_d(p)W_{зкт}(p)k_{oc}} = \frac{1/k_{oc}}{2T_{\mu 3}p(T_{\mu 3}p+1)+1} \approx \frac{1/k_{oc}}{2T_{\mu 3}p+1} \quad (2.16)$$

$$W_{зкс}(p) = \frac{1/0,129}{2 \cdot 0,04p+1} = \frac{7,752}{0,08p+1}$$

Учтем существующую обратную связь по ЭДС двигателя. Внутренний контур объекта регулирования необходимо компенсировать вводом аналогичной обратной связи, но с противоположным знаком. Передаточная функция компенсирующей положительной обратной связи при подаче ее на регулятор тока возбуждения

$$W_{ke}(p) = \frac{C_{es}}{K_{\Gamma} W_{3КТБ}(p)} \quad (2.17)$$

Уточненная передаточная функция замкнутого контура тока возбуждения:

$$W_{3КТБ}(p) = \frac{1/k_{отб}}{2T_{\mu}^2 p^2 + 2T_{\mu} p + 1} = \frac{1/0,3448}{2 \cdot 0,01^2 \cdot p^2 + 2 \cdot 0,01 p + 1} = \frac{2,9}{0,0002 p^2 + 0,02 p + 1}$$

$$W_{ke}(p) = \frac{C_{es} k_{отб}}{K_{\Gamma}} (2T_{\mu}^2 p^2 + 2T_{\mu} p + 1) = \frac{2T_{\mu}^2 k_{отб} C_{es}}{K_{\Gamma}} p^2 + \frac{2T_{\mu} k_{отб} C_{es}}{K_{\Gamma}} p + \frac{k_{отб} C_{es}}{K_{\Gamma}} \quad (2.18)$$

$$W_{ke}(p) = \frac{2 \cdot 0,01^2 \cdot 0,3448 \cdot 6,7497}{19,3103} p^2 + \frac{2 \cdot 0,01 \cdot 0,3448 \cdot 6,7497}{19,3103} p + \frac{0,3448 \cdot 6,7497}{19,3103}$$

$$W_{ke}(p) = 0,000024 p^2 + 0,002410 p + 0,120521$$

Таким образом, вводится положительная обратная связь по скорости и ее первой и второй производным с соответствующими коэффициентами.

Учтем влияние внутренней обратной связи по упругому моменту. Передаточная функция компенсирующей положительной обратной связи на регулятор тока якорной цепи

$$W_{ку}(p) = \frac{1}{C_{MS} W_{3КТ}(p)} = 2T_{\mu 2}^2 \frac{k_{от}}{C_{MS}} p^2 + 2T_{\mu 2} \frac{k_{от}}{C_{MS}} p + \frac{k_{от}}{C_{MS}} \quad (2.19)$$

$$W_{ку}(p) = 0,0008 \frac{0,00658}{6,7497} p^2 + 0,04 \frac{0,00658}{6,7497} p + \frac{0,00658}{6,7497} = 0,78 \cdot 10^{-6} p^2 + 3,899 \cdot 10^{-5} p + 9,749 \cdot 10^{-4}$$

Таким образом, чтобы скомпенсировать влияние внутренней обратной связи по упругому моменту, необходимо ввести на регулятор тока якорной

цепи сигналы положительных обратных связей по упругому моменту, его первой и второй производным с соответствующими коэффициентами.

2.2 Двухконтурная система подчиненного регулирования

На рисунке 2.5 представлена структурная схема двухконтурной системы подчиненного регулирования.

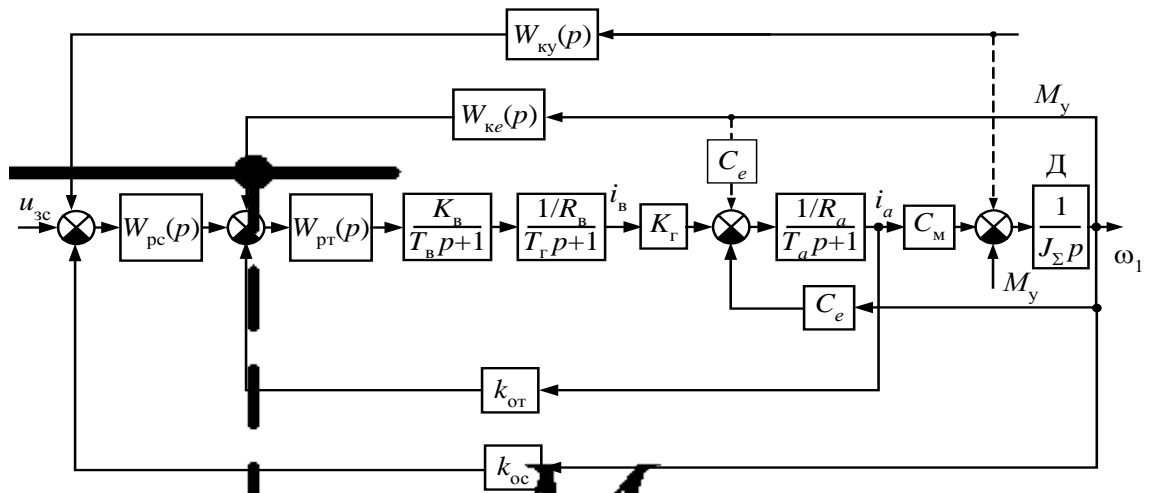


Рисунок 2.5 – Структурная схема двухконтурной системы подчиненного регулирования

а) Контур тока якорной цепи

Структурная схема контура тока якорной цепи представлена на рисунке 2.6.

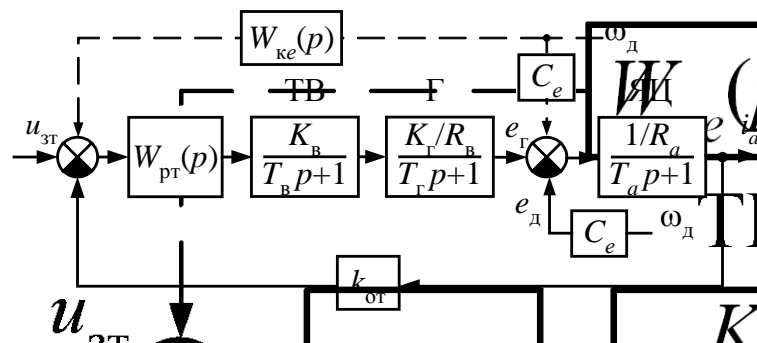


Рисунок 2.6 – Структурная схема контура тока якорной цепи

Некомпенсируемую постоянную времени принимаем равной постоянной времени возбудителя, т.е. $T_{\mu}=T_{\text{в}}=0,01\text{с}$, что справедливо при безинерционном датчике и регуляторе.

Пренебрегаем обратной связью по ЭДС, тогда передаточная функция разомкнутого контура

$$W_{\text{раз.тя}}(p) = W_{\text{рт}}(p)W_{\text{тв}}(p)W_{\text{овг}}(p)W_{\text{яц}}(p)K_{\Gamma}k_{\text{от}}, \quad (2.20)$$

где $k_{\text{от}}$ – коэффициент обратной связи по току якорной цепи, $k_{\text{от}} = \frac{U_{\text{зт}}}{I_{\text{стоп}}}$;

$U_{\text{зт}}$ – напряжение задания по току якорной цепи, равное номинальному напряжению управления;

$I_{\text{стоп}}$ – стопорный ток якоря двигателя.

$$K_{\text{от}} = \frac{U_{\text{зт}}}{I_{\text{стоп}}} = \frac{10}{1520} = 0,00658$$

Желаемая передаточная функция разомкнутого контура

$$W_{\text{раз.тя}}^{\text{ж}}(p) = \frac{1}{2T_{\mu}p(T_{\mu}p + 1)}. \quad (2.21)$$

Приравниваем желаемую и реальную передаточную функцию разомкнутого контура

$$\frac{1}{2T_{\mu}p(T_{\mu}p + 1)} = W_{\text{рт}}(p) \frac{K_{\text{в}}}{T_{\text{в}}p + 1} \frac{1/R_{\text{в}}}{T_{\Gamma}p + 1} \frac{1/R_{\text{а}}}{T_{\text{а}}p + 1} K_{\Gamma}k_{\text{от}} \quad (2.22)$$

Находим передаточную функцию регулятора

$$W_{\text{PT}}(p) = \frac{R_B R_a (T_\Gamma p + 1)(T_a p + 1)}{2T_\mu K_B K_\Gamma k_{\text{OT}} p} = \underbrace{\frac{T_\Gamma + T_a}{T_{\text{И}}}}_{\text{П}} + \underbrace{\frac{1}{T_{\text{И}}}}_{\text{И}} \frac{1}{p} + \underbrace{\frac{T_\Gamma \cdot T_a}{T_{\text{И}}}}_{\text{Д}} p, \quad (2.23)$$

где $T_{\text{И}} = 2T_\mu \cdot K_B \cdot K_\Gamma \cdot K_{\text{OT}} / (R_B \cdot R_a) = 2 \cdot 0,01 \cdot 38,5 \cdot 19,3103 \cdot 0,00658 / (1,3276 \cdot 0,0355) = 2,0759 \text{ с}$.

Полученный регулятор пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИД-регулятор).

$$W_{\text{PT}}(p) = \frac{T_\Gamma + T_a}{T_{\text{И}}} + \frac{1}{T_{\text{И}} p} + \frac{T_\Gamma \cdot T_a}{T_{\text{И}}} \cdot p = \frac{2,0718 + 0,1067}{2,0759} + \frac{1}{2,0759 p} + \frac{2,0718 \cdot 0,1067}{2,0759} \cdot p$$

$$W_{\text{PT}}(p) = 1,049 + 0,482 \frac{1}{p} + 0,106 p$$

Передаточная функция замкнутого контура

$$W_{\text{ЗКТЯ}}(p) = \frac{W_{\text{PT}}(p)W_{\text{ТВ}}(p)W_{\text{ОВГ}}(p)K_\Gamma W_{\text{ЯЦ}}(p)}{1 + W_{\text{PT}}(p)W_{\text{ТВ}}(p)W_{\text{ОВГ}}(p)K_\Gamma W_{\text{ЯЦ}}(p)k_{\text{OT}}} = \frac{1/k_{\text{OT}}}{2T_\mu^2 p^2 + 2T_\mu p + 1} \quad (2.24)$$

$$W_{\text{ЗКТЯ}}(p) \approx \frac{1/k_{\text{OT}}}{2T_\mu p + 1} \quad (2.25)$$

$$W_{\text{ЗКТЯ}}(p) = \frac{1/0,00658}{2 \cdot 0,01 p + 1} = \frac{151,976}{0,02 p + 1}$$

Обозначим $2T_\mu = T_{\mu 2} = 0,02 \text{ с}$.

б) Контур скорости

В одномассовой системе нет сумматора 2. А т.к. результаты синтеза одномассовой системы мы затем распространяем на двухмассовую

электромеханическую систему, то фактически существует внутреннее возмущающее воздействие по упругому моменту. Им при синтезе регулятора скорости мы пренебрегаем и в дальнейшем должны учесть при помощи коррекции по упругому моменту.

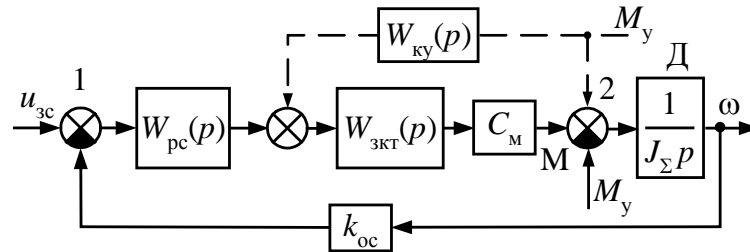


Рисунок 2.7 – Структурная схема контура скорости

где $K_{ос}$ – коэффициент обратной связи по угловой скорости двигателя,

$$K_{ос} = \frac{U_{3c}}{\omega_{дн}} = \frac{10}{77,4926} = 0,129;$$

U_{3c} – напряжение задания по скорости двигателя, равное номинальному напряжению управления;

$\omega_{дн}$ – номинальная угловая скорость двигателя.

Пренебрегаем внутренней обратной связью, по упругому моменту, которая физически существует, когда переходим к двухмассовой электромеханической системе. Это влияние мы учтем в дальнейшем.

Передаточная функция разомкнутого контура скорости

$$W_{раз.с}(p) = W_{рс}(p) \frac{C_m}{J_\Sigma p} \frac{1/k_{от}}{T_{\mu 2} p + 1} k_{ос}. \quad (2.26)$$

Желаемая передаточная функция разомкнутого контура

$$W_{раз.с}^ж(p) = \frac{1}{2T_{\mu 2} p (T_{\mu 2} p + 1)}. \quad (2.27)$$

Приравниваем желаемую и реальную передаточную функцию разомкнутого контура

$$\frac{1}{2T_{\mu 2}p(T_{\mu 2}p+1)} = W_{pc}(p) \frac{C_M}{J_{\Sigma}p} \frac{1/k_{от}}{T_{\mu 2}p+1} k_{oc} \quad (2.28)$$

Находим передаточную функцию регулятора

$$W_{pc}(p) = \frac{k_{от}J_{\Sigma}}{2T_{\mu 2}C_{MS}k_{oc}} = k_{pc} \quad (2.29)$$

$$W_{PC}(p) = K_{PC} = \frac{0,00658 \cdot 43,514}{2 \cdot 0,02 \cdot 6,7497 \cdot 0,129} = 8,221$$

Полученный регулятор пропорциональный (П-регулятор).

Передаточная функция замкнутого контура скорости

$$W_{зкc}(p) = \frac{W_{pc}(p)W_d(p)W_{зкт}(p)}{1 + W_{pc}(p)W_d(p)W_{зкт}(p)k_{oc}} = \frac{1/k_{oc}}{2T_{\mu 2}p(T_{\mu 2}p+1)+1} \approx \frac{1/k_{oc}}{2T_{\mu 2}p+1} \quad (2.30)$$

$$W_{зкc}(p) \approx \frac{1/0,129}{2 \cdot 0,02p+1} = \frac{7,752}{0,04p+1}$$

Учтем существующую обратную связь по ЭДС двигателя. Внутренний контур объекта регулирования необходимо компенсировать вводом аналогичной обратной связи, но с противоположным знаком. Передаточная функция компенсирующей положительной обратной связи при подаче ее на регулятор тока якорной цепи

$$W_{ke}(p) = \frac{C_{es}(T_{\mu}p+1)(T_{\Gamma}p+1)R_B}{K_B K_{\Gamma} W_{\Gamma}(p)} \quad (2.31)$$

$$W_{ke}(p) = C_{es} \frac{(T_{\mu}p+1)(T_{\Gamma}p+1)R_B}{K_B K_{\Gamma}} \frac{T_{\mu 2} K_B K_{\Gamma} k_{от} p}{(T_{\Gamma}p+1)(T_a p+1)R_B R_a} = \frac{T_{\mu 2} C_{es} k_{от}}{R_a} \frac{(T_{\mu}p+1)}{(T_a p+1)} p \quad (2.32)$$

$$W_{ke}(p) = \frac{0,02 \cdot 6,7497 \cdot 0,00658 \cdot (0,01p+1)}{0,0355 \cdot (0,1067p+1)} \cdot p = \frac{0,0009 \cdot (0,01p+1)}{0,003788p+0,0355} \cdot p$$

$$W_{ke}(p) = \frac{0,000009p+0,0009}{0,003788p+0,0355} \cdot p$$

Учтем внутреннюю обратную связь по упругому моменту. Передаточная функция компенсирующей положительной обратной связи по упругому моменту, заводимая на регулятор скорости

$$W_{ky}(p) = \frac{1}{C_M W_{зкт}(p) W_{pc}(p)} \quad (2.33)$$

$$W_{ky}(p) = \frac{2T_{\mu 2} k_{oc}}{J_{\Sigma}} (2T_{\mu 2}^2 p^2 + 2T_{\mu 2} p + 1) \quad (2.34)$$

$$W_{ky}(p) = \frac{2 \cdot 0,02 \cdot 0,129}{43,514} (2 \cdot 0,02^2 \cdot p^2 + 2 \cdot 0,02 \cdot p + 1)$$

$$W_{ky}(p) = 9,488 \cdot 10^{-8} p^2 + 4,744 \cdot 10^{-6} p + 1,186 \cdot 10^{-4}$$

Таким образом, чтобы скомпенсировать влияние внутренней обратной связи по упругому моменту, необходимо ввести на регулятор тока якорной цепи сигналы положительных обратных связей по упругому моменту, его первой и второй производной с соответствующими коэффициентами.

2.3 Многоконтурные системы подчиненного регулирования

Одномассовую систему, как правило, рассматривают в предварительных расчетах при синтезе, а дальнейший анализ проводят для двухмассовой электромеханической системы, которая включает структурную схему двухмассовой системы и электрической части электропривода по системе Г–Д. Двухмассовая структурная схема объекта управления без учета действия внутреннего демпфирования изображена на рисунке 2.8.

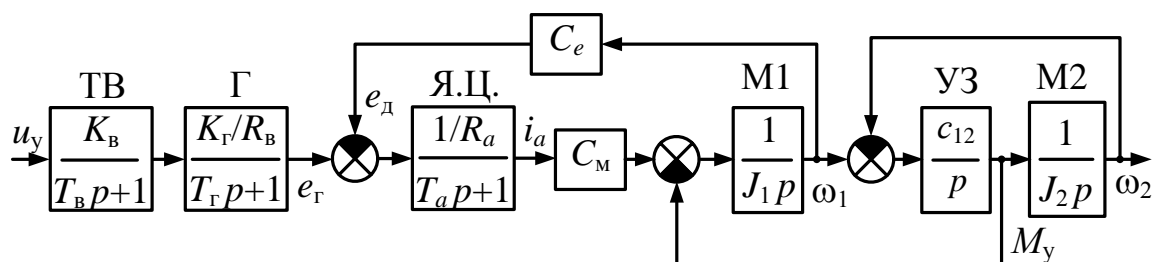


Рисунок 2.8 – Структурная схема двухмассовой электромеханической системы

Для двухмассового объекта регулирования могут использоваться многоконтурные системы подчиненного регулирования, т. е. от регулирования скорости двигателя переходим к регулированию скорости механизма. При этом для синтеза регуляторов временно пренебрегаем перекрестными связями по ЭДС, упругому моменту и скорости механизма, которые будут компенсироваться в дальнейшем. Система электропривода в этом случае может быть четырех- либо пятиконтурная с дополнительными регуляторами упругого момента PM_y и скорости второй массы PC_2 (исполнительного механизма), на которые поступают сигналы обратных связей по этим координатам с соответствующими коэффициентами. [5]

2.3.1 Четырехконтурная система подчиненного регулирования

Для двухмассового объекта регулирования могут использоваться многоконтурные системы подчиненного регулирования, т.е. от регулирования скорости двигателя переходим к регулированию скорости механизма. При этом для синтеза регуляторов временно пренебрегаем перекрестными связями по ЭДС, упругому моменту и скорости механизма, которые будут компенсироваться в дальнейшем. Система электропривода в этом случае может быть четырех- либо пятиконтурная с дополнительными регуляторами упругого момента PM_u и скорости второй массы PC_2 (исполнительного механизма), на которые поступают сигналы обратных связей по этим координатам с соответствующими коэффициентами.

Четырехконтурная система подчиненного регулирования отличается от пятиконтурной отсутствием контура тока возбуждения, что делает систему более быстродействующей. Ее структурная схема показана на рисунке 2.9.

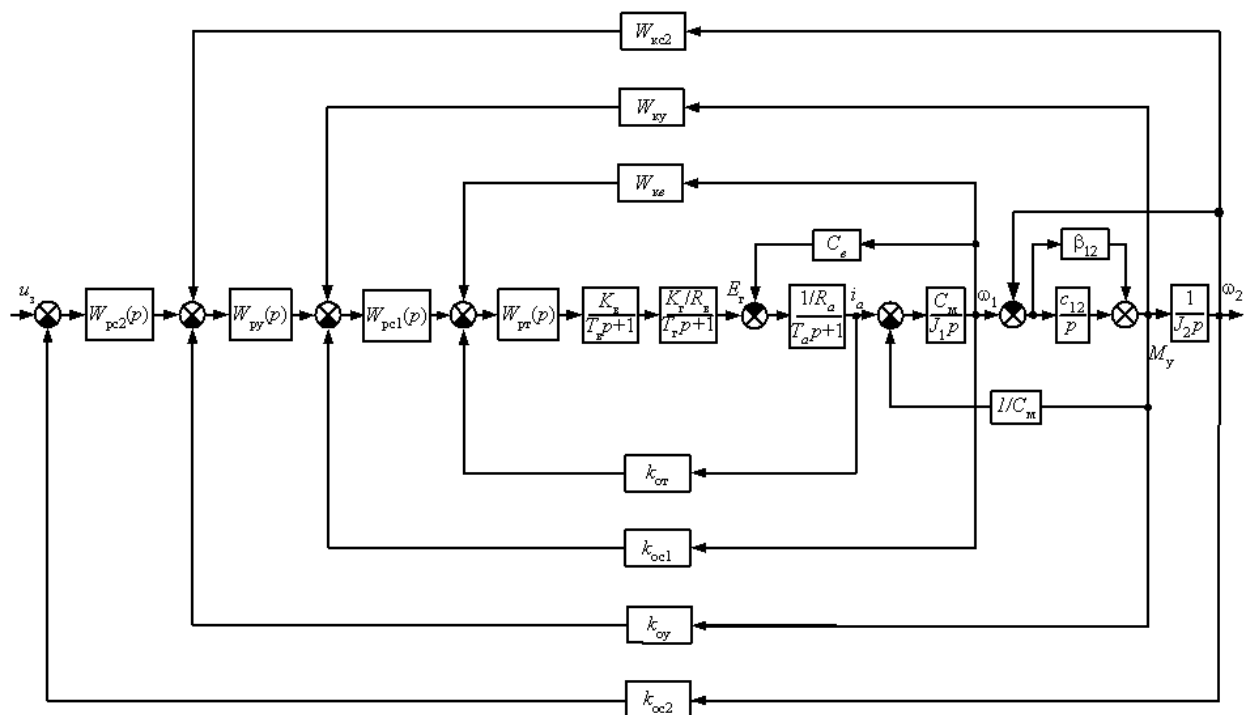


Рисунок 2.9 – Структурная схема четырехконтурной системы подчиненного регулирования

а) Контур тока якоря

Аналогичен рассмотренному при синтезе двухконтурной системы подчиненного регулирования, поэтому

Передаточная функция регулятора

$$W_{PT}(p) = \frac{T_{\Gamma} + T_A}{T_{II1}} + \frac{1}{T_{II1}p} + \frac{T_{\Gamma} \cdot T_A}{T_{II1}} \cdot p = \frac{2,0718 + 0,1067}{2,0759} + \frac{1}{2,0759p} + \frac{2,0718 \cdot 0,1067}{2,0759} \cdot p$$

$$W_{PT}(p) = 1,049 + 0,482 \frac{1}{p} + 0,106p$$

Передаточная функция замкнутого контура тока якоря

$$W_{зктя}(p) = \frac{1/K_{OT}}{2T_{\mu}p + 1} = \frac{1/0,00658}{0,02p + 1} = \frac{151,976}{0,02p + 1}$$

Обозначим $2T_{\mu} = T_{\mu 2} = 0,02$ с.

б) Контур скорости двигателя

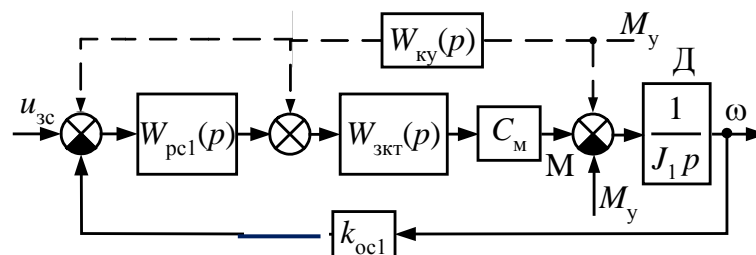


Рисунок 2.10 – Структурная схема контура скорости двигателя

Передаточная функция разомкнутого контура скорости двигателя

$$W_{\text{раз.с1}}(p) = W_{\text{пс1}}(p)W_{\text{зкт}}(p)W_{\text{д}}(p)k_{\text{ос1}} = W_{\text{пс1}}(p)\frac{1/k_{\text{от}}}{T_{\mu 2}p + 1}\frac{C_{\text{мс}}}{J_1 p}k_{\text{ос1}}. \quad (2.35)$$

Желаемая передаточная функция разомкнутого контура

$$W_{\text{раз.с}}^{\text{ж}}(p) = \frac{1}{2T_{\mu 2}p(T_{\mu 2}p + 1)}. \quad (2.36)$$

Приравниваем желаемую и реальную передаточную функцию разомкнутого контура скорости двигателя

$$\frac{1}{2T_{\mu 2}p(T_{\mu 2}p + 1)} = W_{\text{пс1}}(p)\frac{C_{\text{мс}}}{J_1 p}\frac{1/k_{\text{от}}}{T_{\mu 2}p + 1}k_{\text{ос1}} \quad (2.37)$$

Находим передаточную функцию регулятора скорости двигателя

$$W_{\text{пс1}}(p) = \frac{k_{\text{от}}J_1}{2T_{\mu 2}C_{\text{мс}}k_{\text{ос1}}} = k_{\text{пс1}}, \quad (2.38)$$

где $k_{\text{ос1}} = k_{\text{ос2}} = k_{\text{ос}} = \frac{U_{\text{зс1}}}{\omega_{\text{дн}}} = 0,129$ – коэффициент обратной связи по скорости

двигателя.

$$W_{\text{пс1}}(p) = \frac{0,00658 \cdot 39,1}{0,04 \cdot 6,7497 \cdot 0,129} = 7,387$$

Полученный регулятор пропорциональный (П-регулятор).

Передаточная функция замкнутого контура скорости двигателя

$$W_{\text{зкл}}(p) = \frac{W_{\text{ркл}}(p)W_{\text{д}}(p)W_{\text{зкл}}(p)}{1 + W_{\text{ркл}}(p)W_{\text{д}}(p)W_{\text{зкл}}(p)k_{\text{оел}}} = \frac{1/k_{\text{оел}}}{2T_{\mu 2}p(T_{\mu 2}p + 1) + 1} \approx \frac{1/k_{\text{оел}}}{2T_{\mu 2}p + 1} \quad (2.39)$$

$$W_{\text{зкл}}(p) = \frac{1/0,129}{2 \cdot 0,02p + 1} = \frac{7,752}{0,04p + 1}$$

Обозначим $2T_{\mu 2}=T_{\mu 3}=0,04$ с.

в) Контур момента упругого

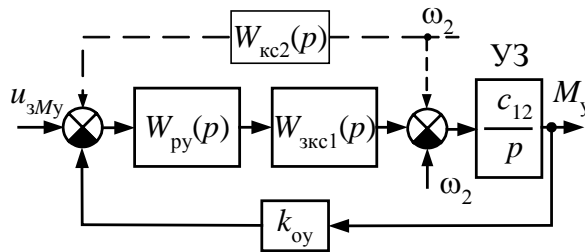


Рисунок 2.11 – Структурная схема контура момента упругого

Передаточная функция разомкнутого контура упругого момента

$$W_{\text{раз.у}}(p) = W_{\text{py}}(p)W_{\text{зкл}}(p)W_{\text{уз}}(p)k_{\text{oy}} = W_{\text{py}}(p)\frac{1/k_{\text{оел}}}{T_{\mu 3}p + 1}\frac{c_{12}}{p}k_{\text{oy}}. \quad (2.40)$$

Желаемая передаточная функция разомкнутого контура

$$W_{\text{раз.у}}^{\text{ж}}(p) = \frac{1}{2T_{\mu 3}p(T_{\mu 3}p + 1)}. \quad (2.41)$$

Приравниваем желаемую и реальную передаточную функцию разомкнутого контура

$$\frac{1}{2T_{\mu 3}p(T_{\mu 3}p+1)} = W_{\text{py}}(p) \frac{1/k_{\text{oc1}}}{T_{\mu 3}p+1} \frac{c_{12}}{p} k_{\text{oy}} \quad (2.42)$$

Находим передаточную функцию регулятора

$$W_{\text{py}}(p) = \frac{k_{\text{oc1}}}{2T_{\mu 3}c_{12}k_{\text{oy}}} = k_{\text{py}} \quad (2.43)$$

$$W_{\text{py}}(p) = \frac{0,129}{0,08 \cdot 1554,5 \cdot 0,0009747} = 1,0642$$

Полученный регулятор пропорциональный (П-регулятор).

Передаточная функция замкнутого контура момента упругого

$$W_{\text{зкy}}(p) = \frac{W_{\text{py}}(p)W_{\text{зкcl}}(p)W_{\text{yз}}(p)}{1 + W_{\text{py}}(p)W_{\text{зкcl}}(p)W_{\text{yз}}(p)k_{\text{oy}}} = \frac{1/k_{\text{oy}}}{2T_{\mu 3}p(T_{\mu 3}p+1)+1} \approx \frac{1/k_{\text{oy}}}{2T_{\mu 3}p+1} \quad (2.44)$$

$$W_{\text{зкy}}(p) = \frac{1/0,0009747}{2 \cdot 0,04p+1} = \frac{1025,954}{0,08p+1},$$

где $k_{\text{oy}} = \frac{U_{\text{зy}}}{M_{\text{стоп}}} = \frac{10}{10259,544} = 0,0009747$ – коэффициент обратной связи по

моменту упругому;

$U_{\text{зy}}$ – напряжение задания по моменту упругому, равное номинальному напряжению управления;

$M_{\text{стоп}}$ – максимальный момент, соответствующий стопорному значению тока якорной цепи.

Обозначим $2T_{\mu 3} = T_{\mu 4} = 0,08$ с.

г) Контур скорости рабочего механизма

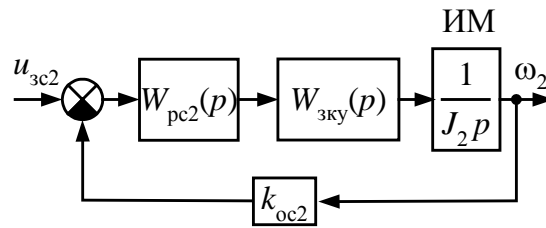


Рисунок 2.12 – Структурная схема контура скорости рабочего механизма

Передаточная функция разомкнутого контура скорости

$$W_{\text{раз.с2}}(p) = W_{\text{pc2}}(p)W_{\text{зкy}}(p)W_{\text{им}}(p)k_{\text{oc2}} = W_{\text{pc2}}(p)\frac{1/k_{\text{oy}}}{T_{\mu4}p + 1}\frac{1}{J_2 p}k_{\text{oc2}}. \quad (2.45)$$

Желаемая передаточная функция разомкнутого контура

$$W_{\text{раз.с2}}^{\text{ж}}(p) = \frac{1}{2T_{\mu4}p(T_{\mu4}p + 1)}. \quad (2.46)$$

Приравниваем желаемую и реальную передаточную функцию разомкнутого контура

$$\frac{1}{2T_{\mu4}p(T_{\mu4}p + 1)} = W_{\text{pc2}}(p)\frac{1}{J_2 p}\frac{1/k_{\text{oy}}}{T_{\mu4}p + 1}k_{\text{oc2}}. \quad (2.47)$$

Находим передаточную функцию регулятора

$$W_{\text{pc2}}(p) = \frac{k_{\text{oy}}J_2}{2T_{\mu4}k_{\text{oc2}}} = k_{\text{pc2}} \quad (2.48)$$

$$W_{pc2}(p) = \frac{0,0009747 \cdot 4,414}{2 \cdot 0,08 \cdot 0,129} = 0,208$$

Полученный регулятор пропорциональный (П-регулятор).

Передаточная функция замкнутого контура скорости

$$W_{зкс2}(p) = \frac{W_{pc2}(p)W_{зку}(p)W_{им}(p)}{1 + W_{pc2}(p)W_{зку}(p)W_{им}(p)k_{oc2}} = \frac{1/k_{oc2}}{2T_{\mu4}p(T_{\mu4}p + 1) + 1} \approx \frac{1/k_{oc2}}{2T_{\mu4}p + 1} \quad (2.49)$$

$$W_{зкс2}(p) = \frac{1/0,129}{2 \cdot 0,08p + 1} = \frac{7,752}{0,16p + 1}$$

Учтем существующую обратную связь по ЭДС двигателя. Внутренний контур объекта регулирования необходимо компенсировать вводом аналогичной обратной связи, но с противоположным знаком. Передаточная функция компенсирующей положительной обратной связи при подаче ее на регулятор тока якорной цепи

$$W_{ке}(p) = \frac{C_{es}(T_{\mu}p + 1)(T_{\Gamma}p + 1)R_{\text{в}}}{K_{\text{в}}K_{\Gamma}W_{\text{рт}}(p)} \quad (2.50)$$

$$W_{ке}(p) = C_{es} \frac{(T_{\mu}p + 1)(T_{\Gamma}p + 1)R_{\text{в}}}{K_{\text{в}}K_{\Gamma}} \frac{T_{\mu2}K_{\text{в}}K_{\Gamma}k_{\text{от}}p}{(T_{\Gamma}p + 1)(T_{\text{а}}p + 1)R_{\text{в}}R_{\text{а}}} = \frac{T_{\mu2}C_{es}k_{\text{от}}}{R_{\text{а}}} \frac{(T_{\mu}p + 1)}{(T_{\text{а}}p + 1)} p \quad (2.51)$$

$$W_{ке}(p) = \frac{0,02 \cdot 6,7497 \cdot 0,00658 \cdot (0,01p + 1)}{0,0355 \cdot (0,1067p + 1)} \cdot p = \frac{0,0009 \cdot (0,01p + 1)}{0,003788p + 0,0355} \cdot p = \frac{0,000009p + 0,0009}{0,003788p + 0,0355} \cdot p$$

Учтем внутреннюю обратную связь по упругому моменту. Передаточная функция компенсирующей положительной обратной связи по упругому моменту, заводимая на регулятор скорости

$$W_{\text{кy}}(p) = \frac{1}{C_{\text{м}} W_{\text{зкт}}(p) W_{\text{pc}}(p)} \quad (2.52)$$

$$W_{\text{кy}}(p) = \frac{2T_{\mu 2} k_{\text{oc}}}{J_{\Sigma}} (2T_{\mu 2}^2 p^2 + 2T_{\mu 2} p + 1) \quad (2.53)$$

$$W_{\text{кy}}(p) = \frac{2 \cdot 0,02 \cdot 0,129}{43,514} (2 \cdot 0,02^2 \cdot p^2 + 2 \cdot 0,02 \cdot p + 1)$$

$$W_{\text{кy}}(p) = 9,488 \cdot 10^{-8} p^2 + 4,744 \cdot 10^{-6} p + 1,186 \cdot 10^{-4}$$

Учтем влияние внутренней обратной связи по скорости второй массы. Компенсирующую связь по скорости второй массы заводим на регулятор упругого момента.

$$W_{\text{кc2}}(p) = \frac{1}{W_{\text{зкc1}}(p) W_{\text{py}}(p)} \quad (2.54)$$

Уточненная передаточная функция замкнутого контура скорости двигателя:

$$W_{\text{зкc}}(p) = \frac{1/k_{\text{oc}}}{2T_{\mu 2} p (T_{\mu 2} p + 1) + 1} \quad (2.55)$$

$$W_{\text{кc2}}(p) = \frac{k_{\text{oc}}}{k_{\text{py}}} 2T_{\mu 2}^2 p^2 + \frac{k_{\text{oc}}}{k_{\text{py}}} 2T_{\mu 2} p + \frac{k_{\text{oc}}}{k_{\text{py}}} \quad (2.56)$$

$$W_{\text{кc2}}(p) = \frac{0,129}{1,0642} 2 \cdot 0,02^2 p^2 + \frac{0,129}{1,0642} 2 \cdot 0,02 p + \frac{0,129}{1,0642}$$

$$W_{\text{кc2}}(p) = 0,97 \cdot 10^{-4} p^2 + 0,485 \cdot 10^{-2} p + 0,121$$

2.3.2 Пятиконтурная система подчиненного регулирования

Структурная схема пятиконтурной системы подчиненного регулирования представлена на рисунке 2.13.

а) Контуры тока возбуждения и тока якорной цепи

Эти контуры аналогичны рассмотренным при синтезе классической трехконтурной системы подчиненного регулирования, поэтому:

– передаточные функции регуляторов имеют вид (2.4) и (2.10):

$$W_{p.t.B}(p) = \frac{T_r p + 1}{T_{и1} p} = \frac{2,0718 p + 1}{0,2 p} = 10,359 + 5 \frac{1}{p},$$

$$\text{где } T_{и1} = 2T_{\mu} K_B k_{отв} / R_B = \frac{0,02 \cdot 38,5 \cdot 0,3448}{1,3276} = 0,2 \text{ с.};$$

$$W_{p.t}(p) = \frac{T_a p + 1}{T_{и2} p} = \frac{0,1067 p + 1}{0,4152 p} = 0,257 + 2,408 \frac{1}{p},$$

$$\text{где } T_{и2} = 2T_{\mu 2} K_{\Gamma} k_{от} / R_a k_{отв} = \frac{2 \cdot 0,02 \cdot 19,3103 \cdot 0,00658}{0,0355 \cdot 0,3448} = 0,4152 \text{ с.}$$

– передаточные функции замкнутых контуров тока возбуждения и тока якоря имеют вид (2.6) и (2.11):

$$W_{з.к.т.в}(p) \approx \frac{1/k_{о.т.в}}{2T_{\mu} p + 1}; \quad W_{з.к.т.я}(p) \approx \frac{1/k_{о.т}}{2T_{\mu 2} p + 1}$$

$$W_{зктв}(p) = \frac{1/0,3448}{2 \cdot 0,01 p + 1} = \frac{2,9}{0,02 p + 1}; \quad W_{зктя}(p) = \frac{1/0,00658}{2 \cdot 0,02 p + 1} = \frac{151,976}{0,04 p + 1}$$

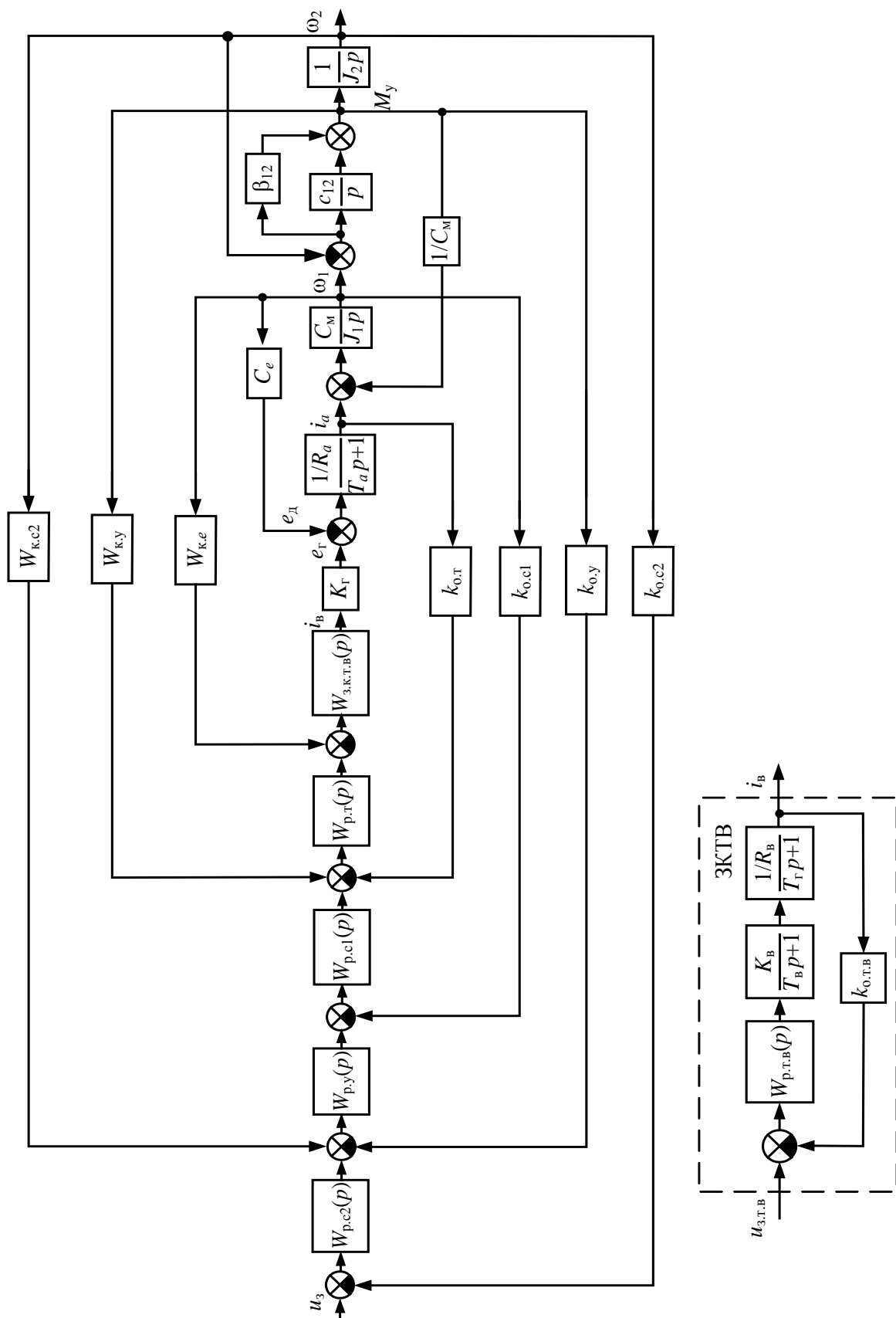


Рисунок 2.13 – Структурная схема пятиконтурной системы подчиненного регулирования

б) Контур скорости двигателя

Обозначим передаточную функцию регулятора скорости двигателя $W_{p.cl}(p)$.

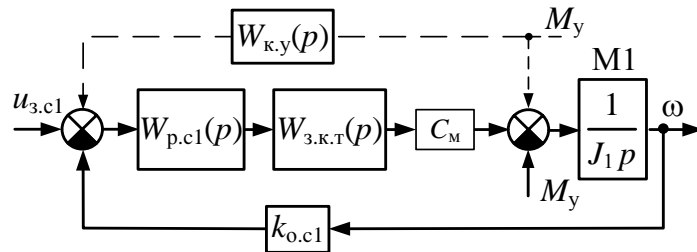


Рисунок 2.14 – Структурная схема контура скорости двигателя

где $k_{o.cl}$ – коэффициент обратной связи по скорости двигателя;

$$k_{o.cl} = \frac{U_{3.cl}}{\omega_{д.н}} = \frac{10}{77,4926} = 0,129, \quad \text{где } U_{3.cl} - \text{напряжение задания по}$$

скорости двигателя, равное номинальному напряжению управления;

$\omega_{д.н}$ – номинальная угловая скорость двигателя.

Передаточная функция разомкнутого контура скорости:

$$W_{раз.cl}(p) = W_{p.cl}(p)W_{3.k.t}(p)W_d(p)k_{o.cl} \quad (2.57)$$

Желаемая передаточная функция разомкнутого контура:

$$W_{раз.cl}^*(p) = \frac{1}{2T_{\mu 3}p(T_{\mu 3}p + 1)}. \quad (2.58)$$

Приравниваем желаемую и реальную передаточную функцию разомкнутого контура:

$$\frac{1}{2T_{\mu 3}p(T_{\mu 3}p+1)} = W_{p.cl}(p) \frac{1/k_{o.T}}{T_{\mu 3}p+1} \frac{C_M}{J_1 p} k_{o.cl} \quad (2.59)$$

Находим передаточную функцию регулятора:

$$W_{p.cl}(p) = \frac{k_{o.T} J_1}{2T_{\mu 3} C_M k_{o.cl}} = k_{p.cl} \quad (2.60)$$

$$W_{p.cl}(p) = \frac{0,00658 \cdot 39,1}{2 \cdot 0,04 \cdot 6,7497 \cdot 0,129} = 3,694$$

Полученный регулятор пропорциональный (П-регулятор).

Передаточная функция замкнутого контура скорости:

$$W_{з.к.cl}(p) = \frac{W_{p.cl}(p)W_{з.к.т}(p)W_d(p)}{1 + W_{p.cl}(p)W_{з.к.т}(p)W_d(p)k_{o.cl}} \quad (2.61)$$

$$W_{з.к.cl}(p) = \frac{1/k_{o.cl}}{2T_{\mu 3}p(T_{\mu 3}p+1)+1} \approx \frac{1/k_{o.cl}}{2T_{\mu 3}p+1} \quad (2.62)$$

$$W_{з.к.с}(p) = \frac{1/0,129}{2 \cdot 0,04p+1} = \frac{7,752}{0,08p+1}$$

Обозначим $2T_{\mu 3} = T_{\mu 4} = 0,08$ с.

Учтем существующую обратную связь по ЭДС двигателя. Внутренний контур объекта регулирования необходимо компенсировать вводом аналогичной обратной связи, но с противоположным знаком. Передаточная функция компенсирующей положительной обратной связи при подаче ее на регулятор тока возбуждения

$$W_{ke}(p) = \frac{C_{es}}{K_{\Gamma} W_{3КТВ}(p)} \quad (2.63)$$

Уточненная передаточная функция замкнутого контура тока возбуждения:

$$W_{3КТВ}(p) = \frac{1/k_{отв}}{2T_{\mu}^2 p^2 + 2T_{\mu} p + 1} = \frac{1/0,3448}{2 \cdot 0,01^2 \cdot p^2 + 2 \cdot 0,01 p + 1} = \frac{2,9}{0,0002 p^2 + 0,02 p + 1}$$

$$W_{ke}(p) = \frac{C_{es} k_{отв}}{K_{\Gamma}} (2T_{\mu}^2 p^2 + 2T_{\mu} p + 1) = \frac{2T_{\mu}^2 k_{отв} C_{es}}{K_{\Gamma}} p^2 + \frac{2T_{\mu} k_{отв} C_{es}}{K_{\Gamma}} p + \frac{k_{отв} C_{es}}{K_{\Gamma}} \quad (2.64)$$

$$W_{ke}(p) = \frac{2 \cdot 0,01^2 \cdot 0,3448 \cdot 6,7497}{19,3103} p^2 + \frac{2 \cdot 0,01 \cdot 0,3448 \cdot 6,7497}{19,3103} p + \frac{0,3448 \cdot 6,7497}{19,3103} =$$

$$= 0,000024 p^2 + 0,002410 p + 0,120521$$

Таким образом, вводится положительная обратная связь по скорости и ее первой и второй производным с соответствующими коэффициентами.

Учтем влияние внутренней обратной связи по упругому моменту. Передаточная функция компенсирующей положительной обратной связи на регулятор тока якорной цепи

$$W_{ky}(p) = \frac{1}{C_{MS} W_{3КТ}(p)} = 2T_{\mu 2}^2 \frac{k_{от}}{C_{MS}} p^2 + 2T_{\mu 2} \frac{k_{от}}{C_{MS}} p + \frac{k_{от}}{C_{MS}} \quad (2.65)$$

$$W_{ky}(p) = 0,0008 \frac{0,00658}{6,7497} p^2 + 0,04 \frac{0,00658}{6,7497} p + \frac{0,00658}{6,7497} = 0,78 \cdot 10^{-6} p^2 + 3,899 \cdot 10^{-5} p + 9,749 \cdot 10^{-4}$$

Таким образом, чтобы скомпенсировать влияние внутренней обратной связи по упругому моменту, необходимо ввести на регулятор тока якорной

цепи сигналы положительных обратных связей по упругому моменту, его первой и второй производным с соответствующими коэффициентами.

в) Контур упругого момента

Обозначим передаточную функцию регулятора момента упругого $W_{p.y}(p)$.

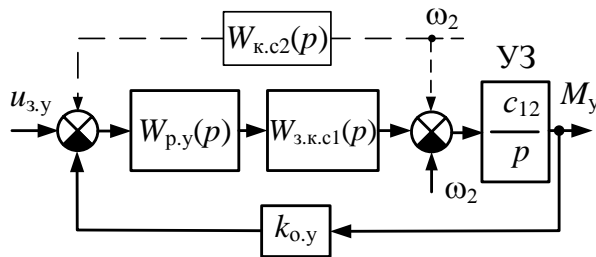


Рисунок 2.15 – Структурная схема контура момента упругого

где $k_{o,y}$ – коэффициент обратной связи по моменту упругому;

$$k_{o,y} = \frac{U_{3,y}}{M_{\text{стоп}}} = \frac{10}{10259,544} = 0,0009747, \text{ где } U_{3,y} \text{ – напряжение задания по}$$

моменту упругому, равное номинальному напряжению управления, $M_{\text{стоп}}$ – максимальный момент, соответствующий стопорному значению тока якорной цепи.

Пренебрегаем внутренней обратной связью по скорости второй массы, которую учтем в дальнейшем.

Передаточная функция разомкнутого контура упругого момента:

$$W_{\text{раз},y}(p) = W_{p,y}(p)W_{3,k.c1}(p)W_{y,3}(p)k_{o,y} \quad (2.66)$$

Желаемая передаточная функция разомкнутого контура:

$$W_{\text{раз.у}}^{\text{ж}}(p) = \frac{1}{2T_{\mu 4}p(T_{\mu 4}p + 1)}. \quad (2.67)$$

Приравниваем желаемую и реальную передаточную функцию разомкнутого контура:

$$\frac{1}{2T_{\mu 4}p(T_{\mu 4}p + 1)} = W_{\text{п.у}}(p) \frac{1/k_{\text{o.кл}}}{T_{\mu 4}p + 1} \frac{c_{12}}{p} k_{\text{o.у}} \quad (2.68)$$

Находим передаточную функцию регулятора:

$$W_{\text{п.у}}(p) = \frac{k_{\text{o.кл}}}{2T_{\mu 4}c_{12}k_{\text{o.у}}} = k_{\text{п.у}} \quad (2.69)$$

$$W_{\text{п.у}}(p) = \frac{0,129}{0,16 \cdot 1554,5 \cdot 0,0009747} = 0,5321$$

Полученный регулятор пропорциональный (П-регулятор).

Передаточная функция замкнутого контура момента упругого:

$$W_{\text{з.к.у}}(p) = \frac{W_{\text{п.у}}(p)W_{\text{з.к.кл}}(p)W_{\text{у.з}}(p)}{1 + W_{\text{п.у}}(p)W_{\text{з.к.кл}}(p)W_{\text{у.з}}(p)k_{\text{o.у}}} \quad (2.70)$$

$$W_{\text{з.к.у}}(p) = \frac{1/k_{\text{o.у}}}{2T_{\mu 4}p(T_{\mu 4}p + 1) + 1} \approx \frac{1/k_{\text{o.у}}}{2T_{\mu 4}p + 1} \quad (2.71)$$

$$W_{\text{з.к.у}}(p) = \frac{1/0,0009747}{2 \cdot 0,08p + 1} = \frac{1025,954}{0,16p + 1}$$

Обозначим $2T_{\mu 4} = T_{\mu 5} = 0,16 \text{ с.}$

г) Контур скорости рабочего механизма

Обозначим передаточную функцию регулятора скорости рабочего механизма $W_{p.c2}(p)$.

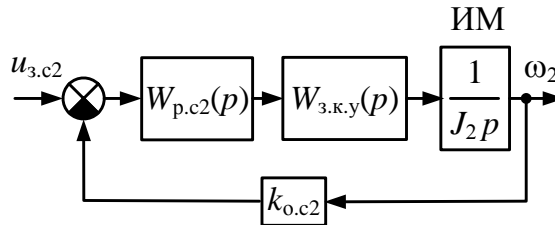


Рисунок 2.16 – Структурная схема контура скорости рабочего механизма

где $k_{o.c2}$ – коэффициент обратной связи по скорости рабочего механизма,

$k_{o.c2} = \frac{U_{3.c2}}{\omega_{д.н}} = 0,129$, где $U_{3.c2}$ – напряжение задания по скорости рабочего

механизма, равное номинальному напряжению управления;

$\omega_{д.н}$ – номинальная угловая скорость двигателя.

Передаточная функция разомкнутого контура скорости рабочего механизма:

$$W_{раз.c2}(p) = W_{p.c2}(p) \frac{1/k_{o.y}}{T_{\mu 5} p + 1} \frac{1}{J_2 p} k_{o.c2}.$$

(2.72)

Желаемая передаточная функция разомкнутого контура:

$$W_{раз.c2}^ж(p) = \frac{1}{2T_{\mu 5} p (T_{\mu 5} p + 1)}. \quad (2.73)$$

Приравниваем желаемую и реальную передаточную функцию разомкнутого контура:

$$\frac{1}{2T_{\mu 5}p(T_{\mu 5}p+1)} = W_{p.c2}(p) \frac{1/k_{o.y}}{T_{\mu 5}p+1} \frac{1}{J_2 p} k_{o.c2}. \quad (2.74)$$

Находим передаточную функцию регулятора скорости рабочего механизма:

$$W_{p.c2}(p) = \frac{k_{o.y}J_2}{2T_{\mu 5}k_{o.c2}} = k_{p.c2} \quad (2.75)$$

$$W_{p.c2}(p) = \frac{0,0009747 \cdot 4,414}{2 \cdot 0,16 \cdot 0,129} = 0,104$$

Полученный регулятор пропорциональный (П-регулятор).

Передаточная функция замкнутого контура скорости рабочего механизма:

$$W_{з.к.c2}(p) = \frac{W_{p.c2}(p)W_{з.к.y}(p)W_{и.м}(p)}{1 + W_{p.c2}(p)W_{з.к.y}(p)W_{и.м}(p)k_{o.c2}} \quad (2.76)$$

$$W_{з.к.c2}(p) = \frac{1/k_{o.c2}}{2T_{\mu 5}p(T_{\mu 5}p+1)+1} \approx \frac{1/k_{o.c2}}{2T_{\mu 5}p+1} \quad (2.77)$$

$$W_{з.к.c2}(p) = \frac{1/0,129}{2 \cdot 0,08p+1} = \frac{7,752}{0,32p+1}$$

Учтем влияние внутренней обратной связи по скорости второй массы. Компенсирующую связь скорости второй массы заводим на регулятор упругого момента.

$$W_{\text{к.с2}}(p) = \frac{1}{W_{\text{з.к.с1}}'(p) W_{\text{р.у}}(p)}. \quad (2.78)$$

Уточненная передаточная функция замкнутого контура скорости двигателя:

$$W_{\text{з.к.с1}}'(p) = \frac{1/k_{\text{о.с1}}}{2T_{\mu3} p (T_{\mu3} p + 1) + 1} \quad (2.79)$$

$$W_{\text{к.с2}}(p) = \frac{k_{\text{о.с}}}{k_{\text{р.у}}} 2T_{\mu3}^2 p^2 + \frac{k_{\text{о.с}}}{k_{\text{р.у}}} 2T_{\mu3} p + \frac{k_{\text{о.с}}}{k_{\text{р.у}}}. \quad (2.80)$$

$$W_{\text{к.с2}}(p) = \frac{0,129}{0,5321} 2 \cdot 0,04^2 p^2 + \frac{0,129}{0,5321} 2 \cdot 0,04 p + \frac{0,129}{0,5321}$$

$$W_{\text{к.с2}}(p) = 7,758 \cdot 10^{-4} p^2 + 1,939 \cdot 10^{-2} p + 0,242$$

Таким образом, чтобы компенсировать влияние внутренней обратной связи по скорости второй массы, необходимо ввести на регулятор момента упругого сигналы положительных обратных связей по скорости второй массы, ее первой и второй производным с соответствующими коэффициентами.

Вывод к разделу 2:

Если рассматривать электропривод как одномассовую электромеханическую систему, то можно применить трехконтурную или двухконтурную систему подчиненного регулирования. В случае применения двухконтурной системы подчиненного регулирования регулятор тока должен иметь структуру ПИД-регулятора. Кроме того, для повышения качества

управления могут быть применены, совместно или раздельно, параллельные коррекции ЭДС двигателя и момента упругого.

Если рассматривать электропривод как двухмассовую электромеханическую систему, то нужно применять многоконтурную систему подчиненного регулирования: четырехконтурную или пятиконтурную. Данный подход позволяет от регулирования скорости двигателя перейти к регулированию скорости механизма. При этом для синтеза регуляторов временно пренебрегаем перекрестными связями по ЭДС, упругому моменту и скорости механизма, которые необходимо компенсировать в дальнейшем. [6]

3 Исследование динамики электропривода с последовательной коррекцией координат

Для большинства электроприводов достаточно, чтобы привод был быстродействующим, но при этом перерегулирование выходной величины было небольшим. В системах подчиненного регулирования координаты корректируются последовательной, начиная с внутренних, при этом внутренний контур подчиняется внешнему. Контур рассчитывается по методике «технического оптимума», т.е. задаваясь желаемой передаточной функцией контура, определяют передаточную функцию регулятора. [7]

В данной работе для механизма подъема экскаватора ЭКГ-8И рассмотрены переходные процессы двух- и трехконтурной системы подчиненного регулирования (СПР) внутренних координат объекта управления, полученные с помощью пакета MATLAB Simulink.

Таблица 2.1 – Двухконтурная СПР

$T_{мон}, с$	$M_{y\Sigma max}, о.е.$	$t_{nn}, с$
0,1	3,7289	6,5
0,2	3,7274	6,5
0,3	3,6419	6,5
0,4	3,4762	6,3
0,5	3,2330	6,3
0,6	2,8949	6,3
0,7	2,6390	6,0
0,8	2,4455	6,0
0,9	2,2934	5,7
1,0	2,1699	5,2

Таблица 2.2 – Трехконтурная СПР

$T_{\text{стоп}}, \text{с}$	$M_{y\Sigma \max}, \text{o.e.}$	$t_{\text{nn}}, \text{с}$
0,1	3,6492	6,2
0,2	3,6527	6,2
0,3	3,5757	6,2
0,4	3,4632	6,2
0,5	3,2747	6,2
0,6	2,9748	6,2
0,7	2,7204	6,2
0,8	2,5246	5,9
0,9	2,3862	5,9
1,0	2,2698	5,5

Для того что бы бросок тока якорной цепи не превышал стопорное значение использована отсечка по току якорной цепи. Рассмотрены переходные процессы электропривода с системой подчиненного регулирования при темпе стопорения $T_{\text{стоп}}$ от 0,1 до 1 с шагом 0,1. Осциллограммы переходных процессов двух- и трехконтурной систем подчиненного регулирования представлены в приложениях Г и Д.

Оценка осциллограмм и значений переходных процессов показала, что при увеличении $T_{\text{стоп}}$ увеличивается быстродействие системы и уменьшаются броски упругого момента. Наилучший результат в плане быстродействия и ограничения упругого момента у двухконтурной системы подчиненного регулирования показала осциллограмма переходных процессов при $T_{\text{стоп}} = 1$ с, $t_{\text{nn}} = 5,2$ с.

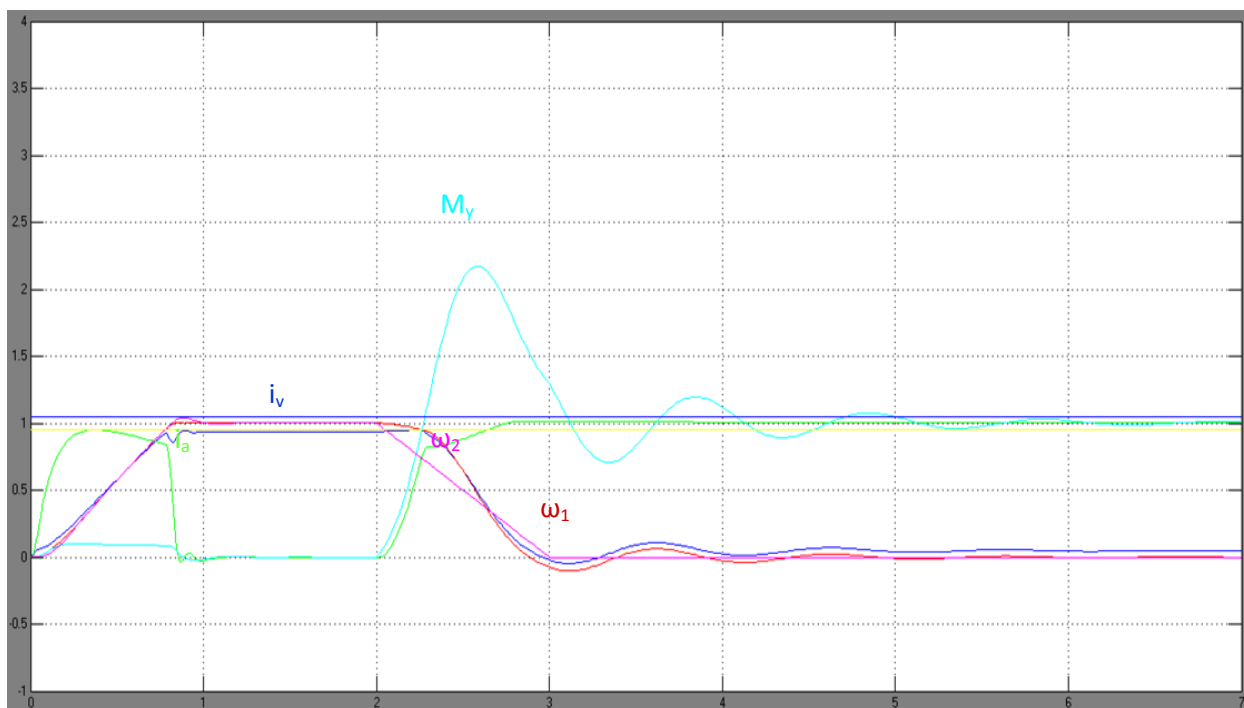


Рисунок 2.17 – Осциллограммы переходных процессов электромеханической системы с двухконтурной системой подчиненного регулирования при $T_{мон} = 1$

Наихудший результат у двухконтурной системы подчиненного регулирования при $T_{мон} = 0,1$ с, $t_{пп} = 6,5$ с.

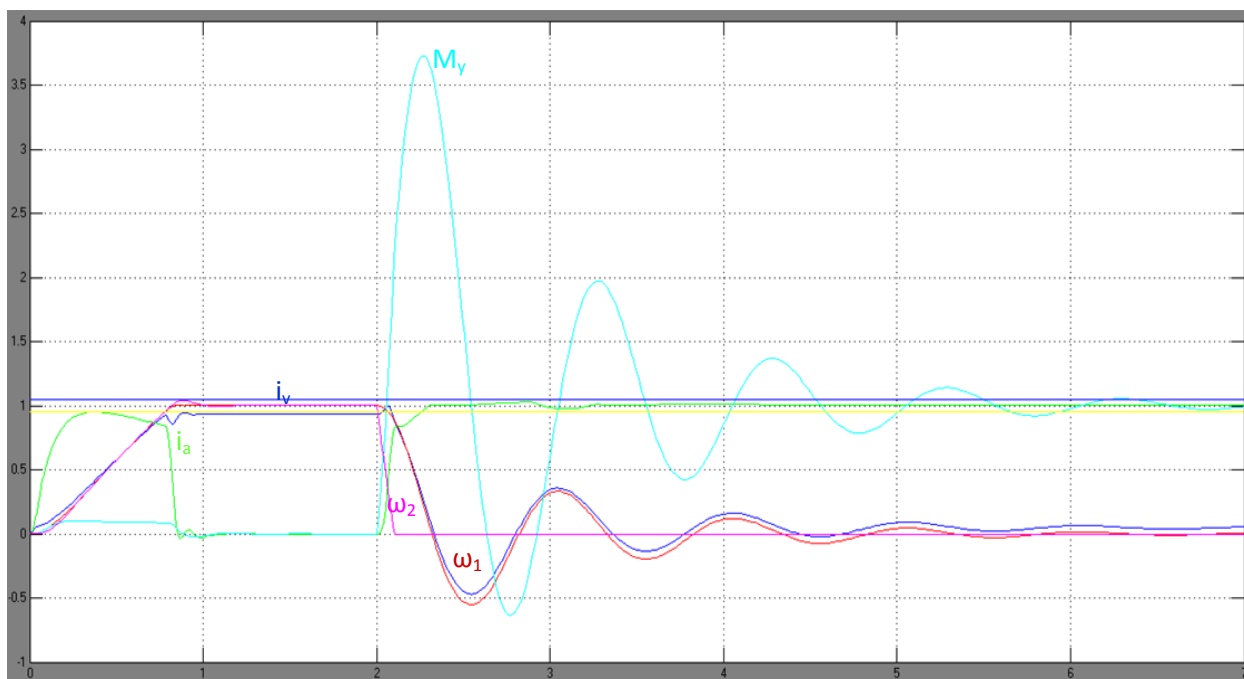


Рисунок 2.18 – Осциллограммы переходных процессов электромеханической системы с двухконтурной системой подчиненного регулирования при $T_{мон} = 0,1$

Аналогично для трехконтурной системы подчиненного регулирования:

Наилучший результат при $T_{смон} = 1$ с, $t_{пп} = 5,5$ с.

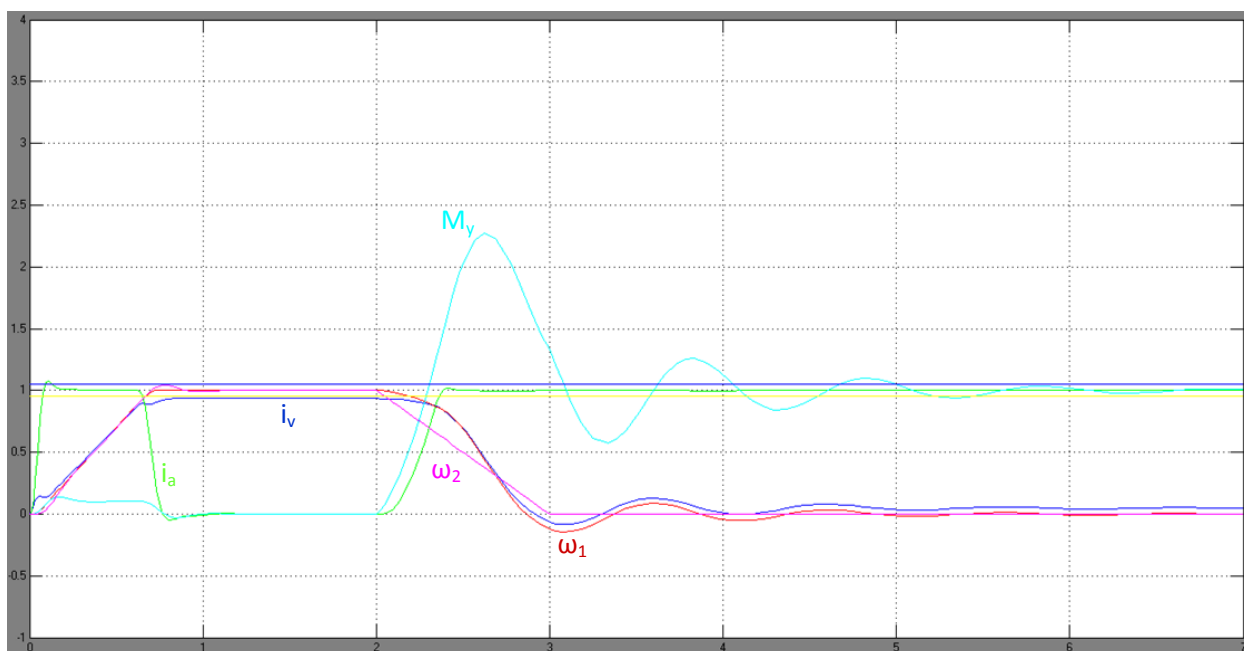


Рисунок 2.19 – Осциллограммы переходных процессов электромеханической системы с трехконтурной системой подчиненного регулирования при $T_{смон} = 1$

Наихудший результат при $T_{смон} = 0,1$ с, $t_{пп} = 6,2$ с.

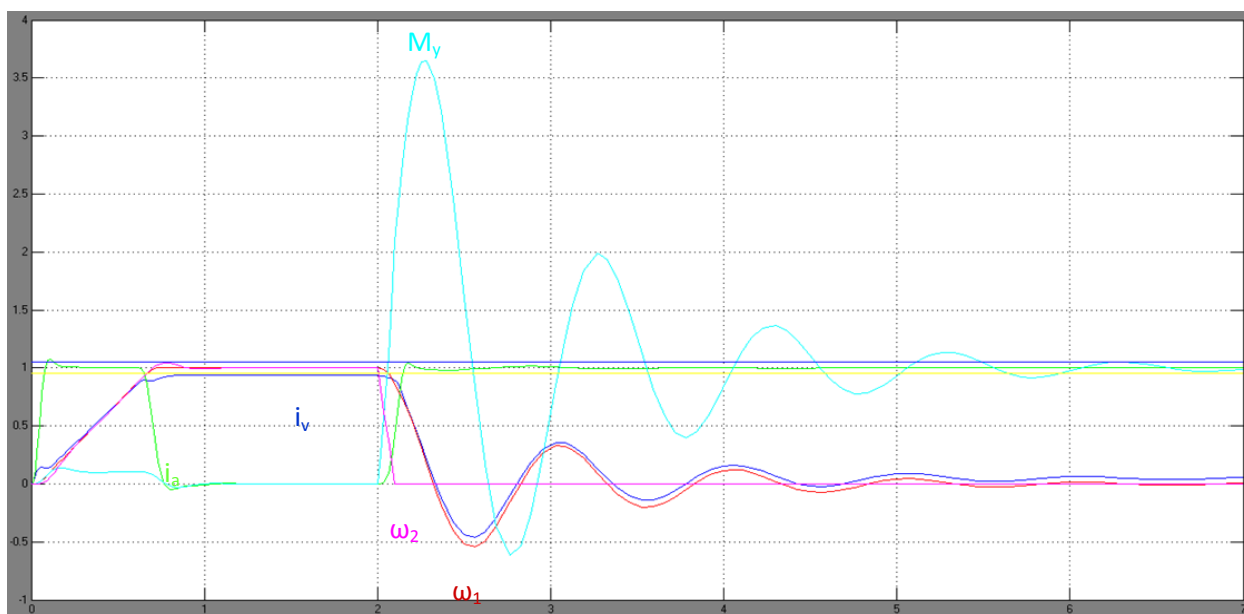


Рисунок 2.20 - Осциллограммы переходных процессов электромеханической системы с трехконтурной системой подчиненного регулирования при $T_{смон} = 0,1$ с

Сравнивая двух- и трехконтурные системы подчиненного регулирования, можно сделать вывод, что более быстродействующей являются двухконтурная система подчиненного регулирования при наибольшем T_{stop} , менее быстродействующей – двухконтурная при наименьшем T_{stop} . Также двухконтурная система подчиненного регулирования лучше всего ограничивает броски упругого момента при наибольших значениях T_{stop} .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В выпускной квалификационной работе были представлены результаты исследования динамики электромеханической системы механизма подъема экскаватора с различными системами управления электроприводом - системами подчиненного регулирования.

В настоящее время Парк экскаваторов в России примерно на 80% изношен, только в Хакасии имеется несколько разрезов: Изыхский разрез, Черногорский угольный комбинат, «Разрез Степной», Сорский молибденовый комбинат и др. Ограничение динамических нагрузок в экскаваторах позволит повысить надежность работы и увеличить производительность. На экскаваторах серийно применяют только модернизированные системы подчиненного регулирования профессора В.И. Ключева – специфические системы, в которых внутренним контуром является контур тока якоря, а внешним – контур питающего напряжения. Их можно отнести к системам последовательной коррекции.

Недостатком систем подчиненного регулирования является сложность синтеза в результате появившейся необходимости компенсации внутренних обратных связей. Реализовывать данные компенсации на практике также сложно.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Кочетков, В. П. Основы теории управления: учебное пособие. 2-е изд., испр. – Абакан: Изд-во ХГУ им Н.Ф. Катанова, 2007. – 272 с.
2. Кочетков, В. П., Багаутинов, Г. А. Теория автоматизированного электропривода: учеб. пособие. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 1992. – 328 с.
3. Бургин, Б. Ш. Анализ и синтез двухмассовых электромеханических систем / Новосиб. электротехн. ин-т. – Новосибирск, 1992. – 199 с.
4. Рудаков, В. В., Синтез электроприводов с последовательной коррекцией / В. В. Рудаков, Р. П. Мартикайнен, – Л.: Энергия, Ленингр. отделение, 1972. – 120 с.
5. Борцов, Ю. А., Шестаков, В. М. Исследование и оптимизация динамики систем подчиненного регулирования с упругими механическими передачами. // Электротехническая промышленность. Сер. Электропривод. – 1972. – Вып. 5 (14) – 6 (15).
6. Ключев, В. И. Учебное пособие по курсу «Теория электропривода» 2-е издание перераб. и доп. / В. И. Ключев. – М.: Энергоатомиздат, 2001. – 704 с.
7. Ключев, В. И. Ограничение динамических нагрузок электропривода / В. И. Ключев. – М.: Энергия, 1973. – 320 с.
8. Кочетков, В. П. Основы электромеханики: учеб. пособие для студентов высш. учеб. заведений / В. П. Кочетков [и др.]; под ред. В. П. Кочеткова. – Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2010. – 624 с.
9. Беллман, Р. Динамическое программирование. / Р. Беллман, – М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1960. – 400 с.
10. Кочетков, В. П. Оптимальное управление электроприводами / В. П. Кочетков, В. А. Троян. – Красноярск: Изд-во Красн. ун-та, 1987. – 143 с.

11. Чистов, В. П. Оптимальное управление электрическими приводами / В. П. Чистов, В. И. Бондаренко, В. А. Святославский. – М.: Наука, 1973. – 232 с.
12. Кочетков, В. П. Комбинированные оптимальные системы управления электроприводом // Оригиналы докладов. VI науч.-техн. конф. с международным участием «Элма-90». N 13. ЦИНТИ. – София, 1991. – с.
13. Вуль, Ю. Я. Наладка электроприводов экскаваторов [текст] / Ю. Я. Вуль, В. И. Ключев, Л. В. Седаков. 2-е изд., перераб. и доп. – М: Недра, 1975. – 312 с.
14. Ключев, В. И. Теория электропривода [текст]: учебник для вузов. 3-е изд., перераб. и доп. / В.И. Ключев. – М.: Энергоатомиздат, 2001. – 704 с., ил.
15. Ключев, В. И. Электропривод и автоматизация общепромышленных механизмов [текст]: учебник для вузов / В.И. Ключев, В. М. Терехов. – М.: Энергия, 1980. – 360 с., ил.
16. Кочетков, В. П. К вопросу о математической модели электромеханической системы [текст] / В. П. Кочетков, П. Э. Подборский // Сб. трудов XVII Межд. науч. конф. – Кострома: Изд-во Костромского гос. технол. ун-та, 2004. – С. 173–175.
17. Кочетков, В. П. К вопросу о физико-математическом моделировании динамики экскаваторного электропривода [текст] / В.П. Кочетков, А. А Колесников, А. В Коловский // Автоматизированный электропривод и промышленная электроника в металлургической и горно-топливной отраслях: тр. 3-ей всероссийской научн.-практ. конф. – Новокузнецк: СибГИУ, 2006. – С. 76–81.
18. Кочетков, В. П. Компьютерное моделирование электропривода с учетом жесткости и зазора в механической части [текст] / В. П. Кочетков, П. Э. Подборский // Сб. трудов 5-й Межд. науч.-тех. конф. Ч. 1. – СПб: «Нестор», 2004. – С. 230–234.

19. Кочетков, В. П. Оптимизация систем автоматического управления экскаваторного электропривода [текст] / В. П. Кочетков, А. В. Коловский, Н. С. Дьяченко, И. С. Рублевский // Системы автоматизации в образовании, науке и производстве: тр. VI всероссийской научн.-практ. конф. – Новокузнецк: СибГИУ, 2007. – С. 223–227.
20. Кочетков, В. П. Оптимизация управления технологическим процессом открытой добычи полезных ископаемых карьерными экскаваторами [текст]: дис. ... докт. техн. наук: 05.13.07 / Кочетков Владимир Петрович. – Красноярск, 1996. – 469 с. – Библиогр.: 390–422.
21. Кочетков, В. П. Основы электропривода [текст]: учеб. пособие. / В. П. Кочетков. – 2-е изд., испр. – Абакан: Сиб. федер. ун-т; ХТИ – Филиал СФУ, 2007. – 272 с.
22. Кочетков, В. П. Совершенствование экскаваторного электропривода [Текст] / В. П. Кочетков, А. В. Коловский // Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири (СИБРЕСУРС-17-2011): доклады 17-й Междунар. научн.-практ. конф. – Томск: САН ВШ; В-Спектр, 2011. – С. 84–88.
23. Кочетков, В. П. Теория автоматизированного электропривода [текст]: учеб. пособие / В. П. Кочетков, Г. А. Багаутинов. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 1992. – 328 с.
24. Подборский, П. Э. Совершенствование методов синтеза систем управления электроприводами поворотных механизмов карьерных экскаваторов [текст] : дис. ... канд. техн. наук : 05.09.03 / Подборский Павел Эдуардович. – Абакан, 2006. – 205 с.
25. Елисеев, В. А. Справочник по автоматизированному электроприводу / под ред. В. А. Елисеева и А. В. Шинянского. - М.: Энергоатомиздат, 1983. – 616 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Каталожные данные экскаватора приведены в табл. А1.

Таблица А.1 – Технические характеристики экскаватора ЭКГ-8И

Элемент характеристики	Параметры экскаватора ЭКГ-8И
Емкость ковша, м ³	8
Масса ковша, т	15.6
Длина стрелы, м	13.4
Длина рукояти, м	11.5
Масса рукояти, т	10.4
Максимальная высота черпания, м	13.3
Максимальный радиус черпания, м	17.5
Максимальный вылет рукояти, м	11.1
Высота оси пяты стрелы, м	5.01
Высота напорного вала, м	8.31
Угол наклона стрелы, град.	47
Диаметр головного блока стрелы, м	1.6
Диаметр барабана подъемной лебедки, м	1.4
Диаметр напорного барабана, м	1.2
Максимальная скорость подъема ковша, м/с	0.94
Максимальная скорость напора, м/с	0.45
Максимальное усилие в канате (копающий механизм), кН	784
Максимальное усилие в канате (напорный механизм), кН	350
Расчетная продолжительность цикла при повороте на 90°, с.	23
Передаточные числа механизмов	
напора	41
подъема	25.41
поворота	268.7

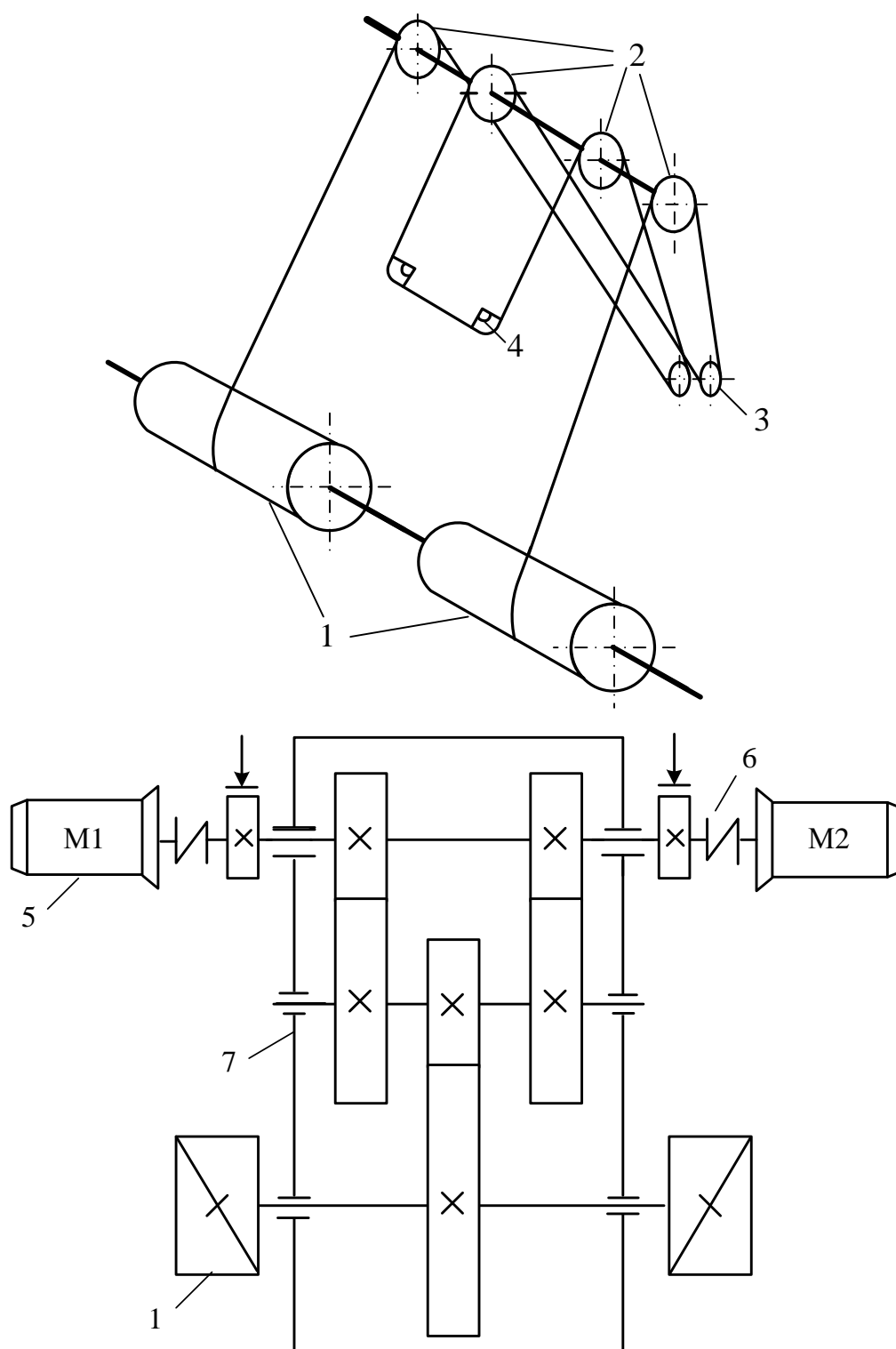
ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Каталожные данные двигателя и генератора приведены в табл. Б.1.

Таблица Б.1 – Сведения о параметрах электропривода подъема экскаватора ЭКГ-8И

Наименование	Обозначение	Генератор	Двигатель
Тип	-	ГПЭ 450-1000	ДПЭ-82А
Количество, шт.	-	1	2
Мощность, кВт	-	450	190
Напряжение, В	$U_{a.г.н}, U_{a.д.н}$	560	270
Ток номинальный, А	$I_{a.г.н}, I_{a.д.н}$	895	760
Ток стопорный, А	$-, I_{a.д.н}$	—	1520
Угловая скорость, рад/с	$\omega_{г.н}, \omega_{д.н}$	104,72	77.4926
Сопротивление якоря, Ом	$R_{я.г}, R_{я.д}$	7.5×10^{-3}	3.9×10^{-3}
Сопротивление дополнительных полюсов, Ом	$R_{д.п.г}, R_{д.п.д}$	1.63×10^{-3}	3.25×10^{-3}
Сопротивление компенсационной обмотки, Ом	$R_{к.о.г}, R_{к.о.д}$	5.16×10^{-3}	—
Напряжение возбуждения, В	$U_{в.н}, -$	38.5	85
Ток возбуждения, А	$I_{в.н}, -$	29	19.5
Сопротивление обмотки возбуждения, Ом	$R_{в}, -$	1.3276	4.359
Число полюсов, шт.	$p_{г}, p_{д}$	4	4
Число витков на полюсе, шт.	$N_{г}, -$	300	450
Номинальный поток полюса, Вб	$Q_{г.н}, -$	5.78×10^{-2}	—
Момент инерции, кг·м ²	$-, J_{д}$	—	17

ПРИЛОЖЕНИЕ В



1 – барабаны подъемной лебедки, 2 – головные блоки стрелы, 3 – блоки подвески ковша, 4 – уравнивательные полублоки стрелы, 5 – электродвигатель, 6 – муфта предельного момента, 7 – корпус редуктора.

Рисунок В.1 – Кинематическая схема механизма подъема экскаватора ЭКГ-8И

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Осциллограммы переходных процессов электромеханической системы с двухконтурной системой подчиненного регулирования

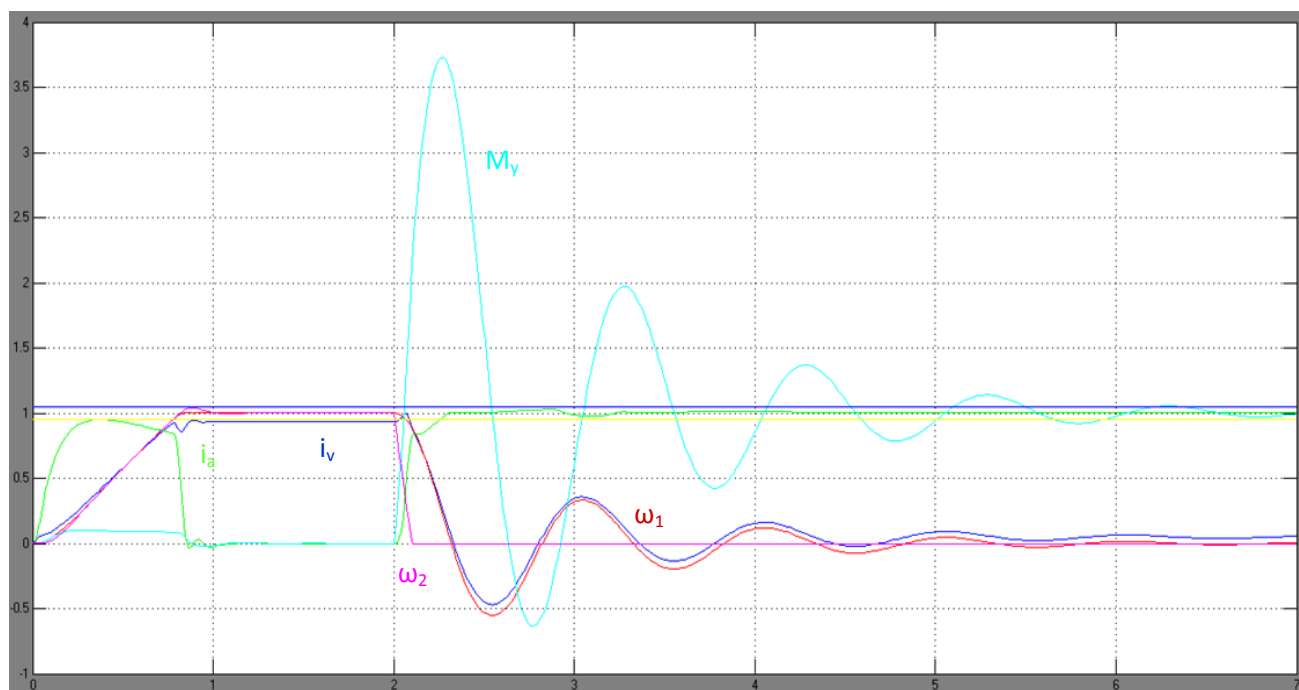


Рисунок Г.1 – Осциллограммы переходных процессов при $T_{\text{стоп}} = 0,1$ с

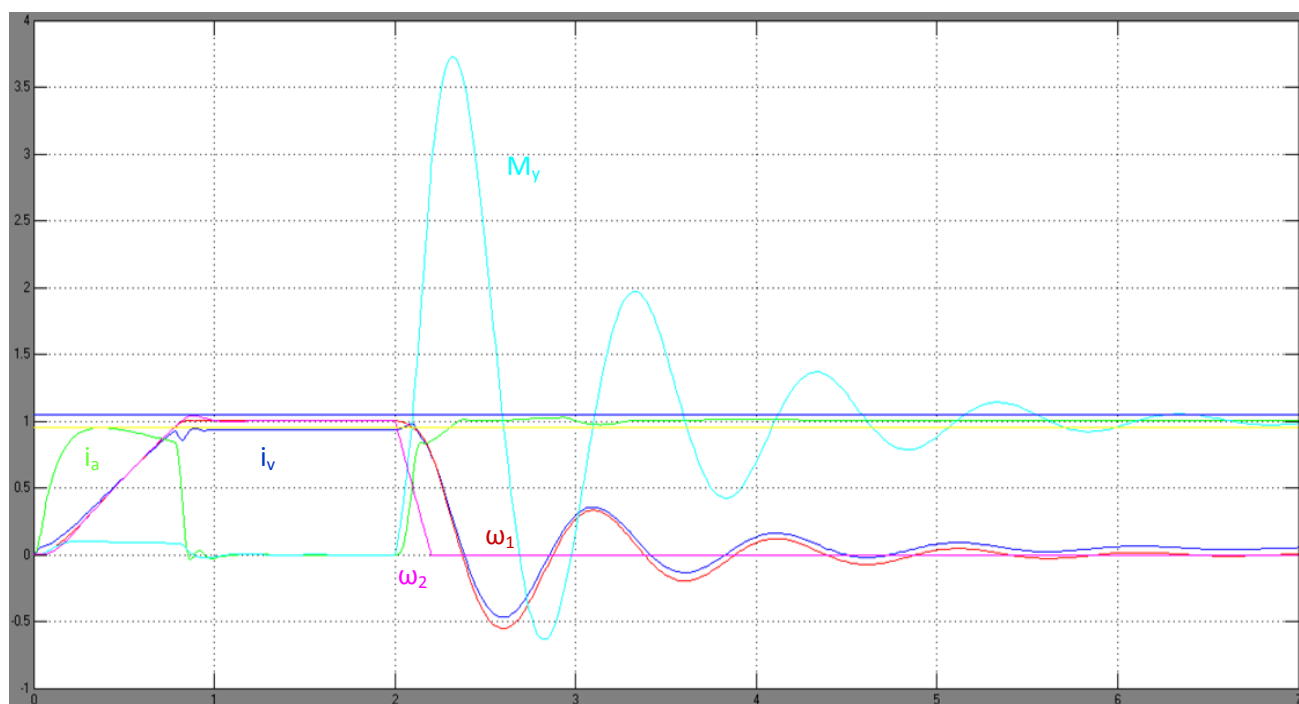


Рисунок Г.2 – Осциллограммы переходных процессов при $T_{\text{стоп}} = 0,2$ с

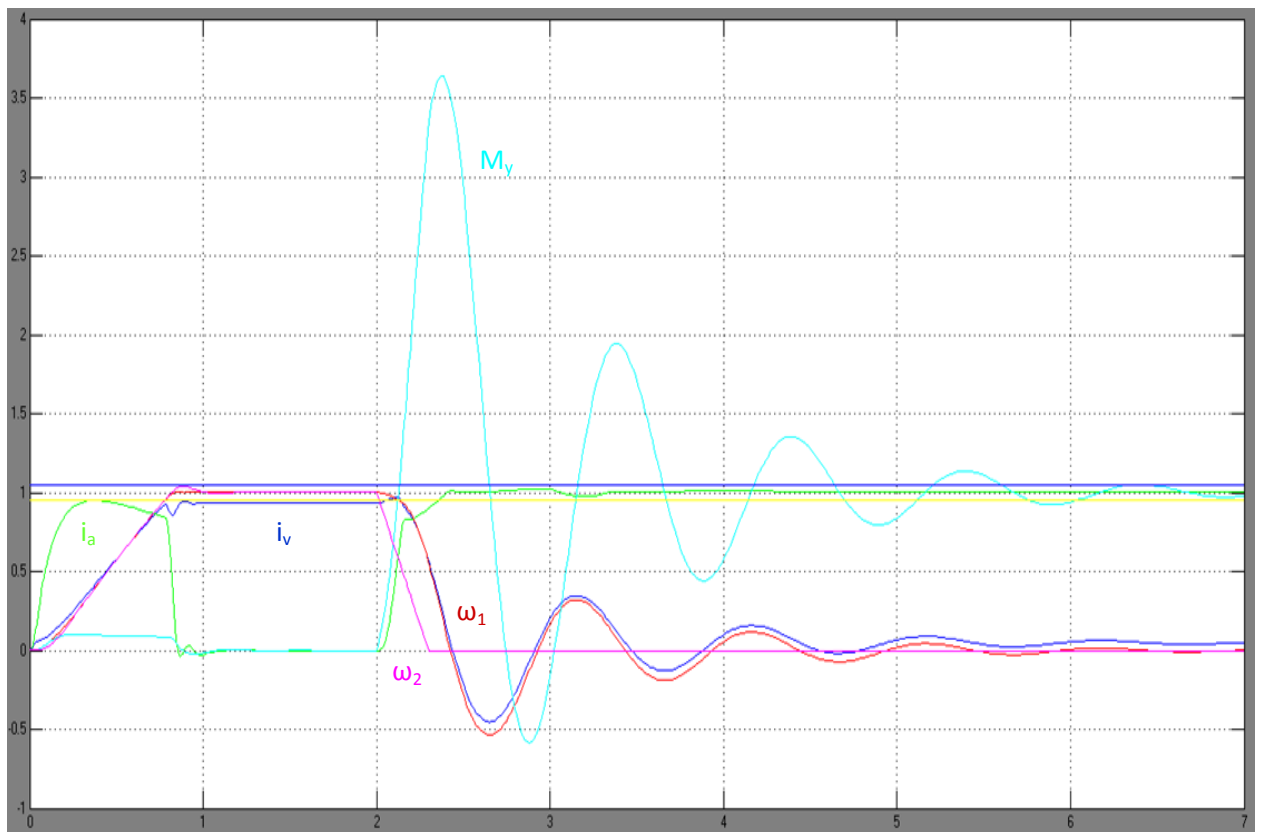


Рисунок Г.3 – Осциллограммы переходных процессов при $T_{\text{стоп}} = 0,3 \text{ с}$

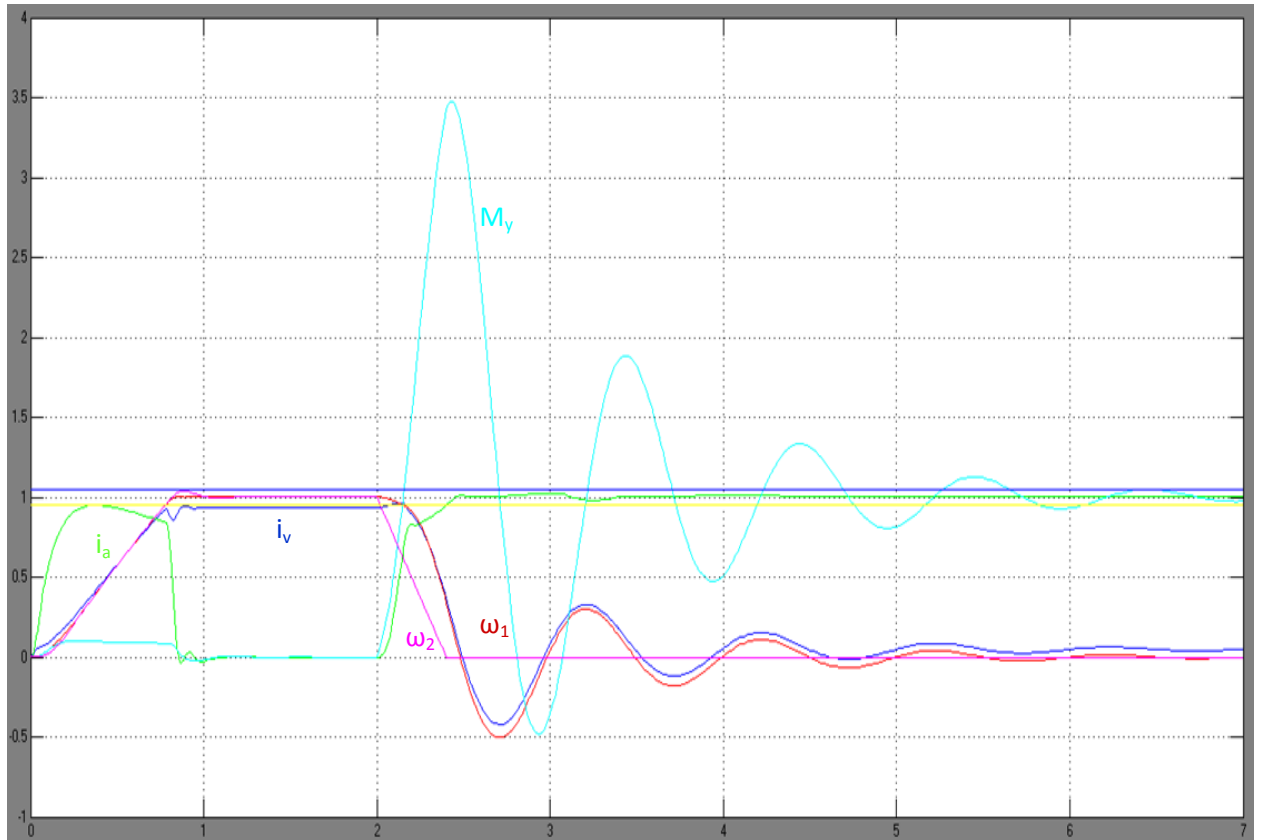


Рисунок Г.4 – Осциллограммы переходных процессов при $T_{\text{стоп}} = 0,4 \text{ с}$

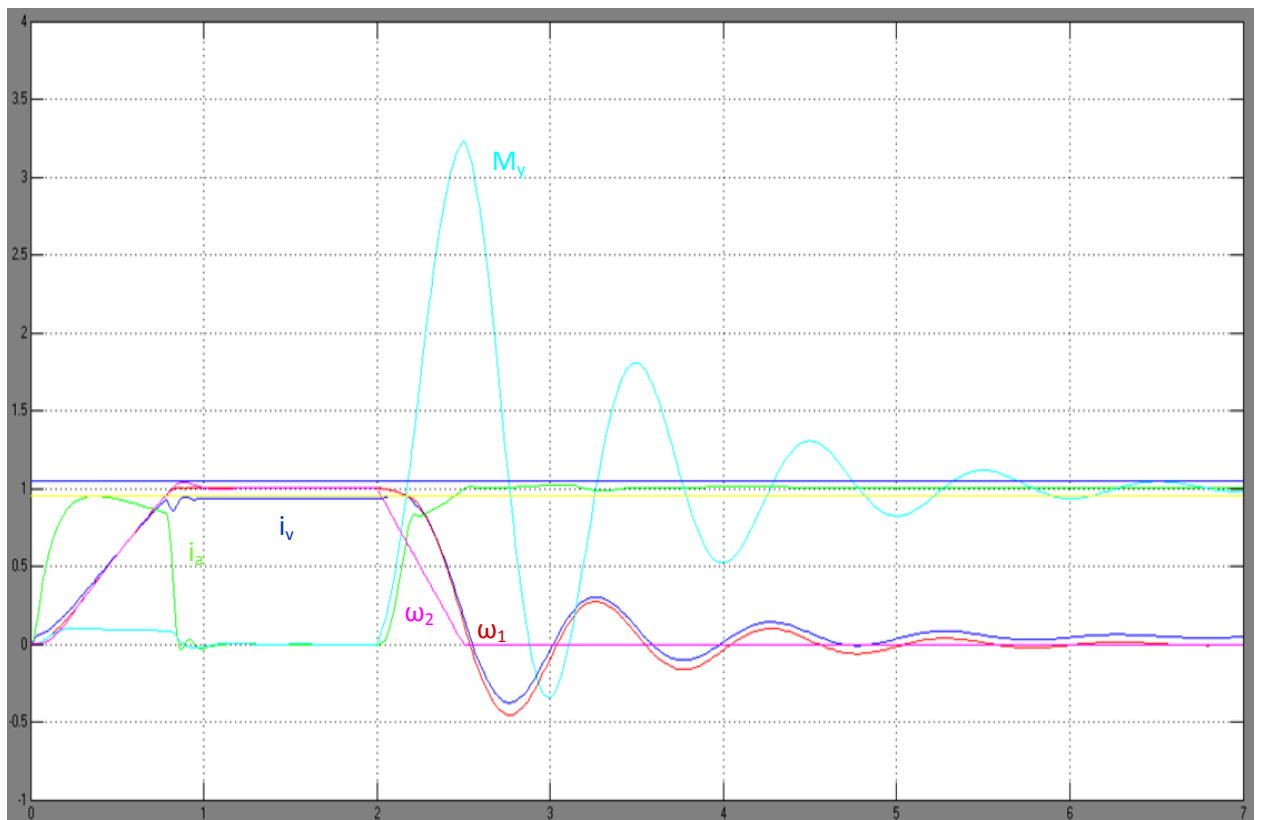


Рисунок Г.5 – Осциллограммы переходных процессов при $T_{\text{стоп}} = 0,5 \text{ с}$

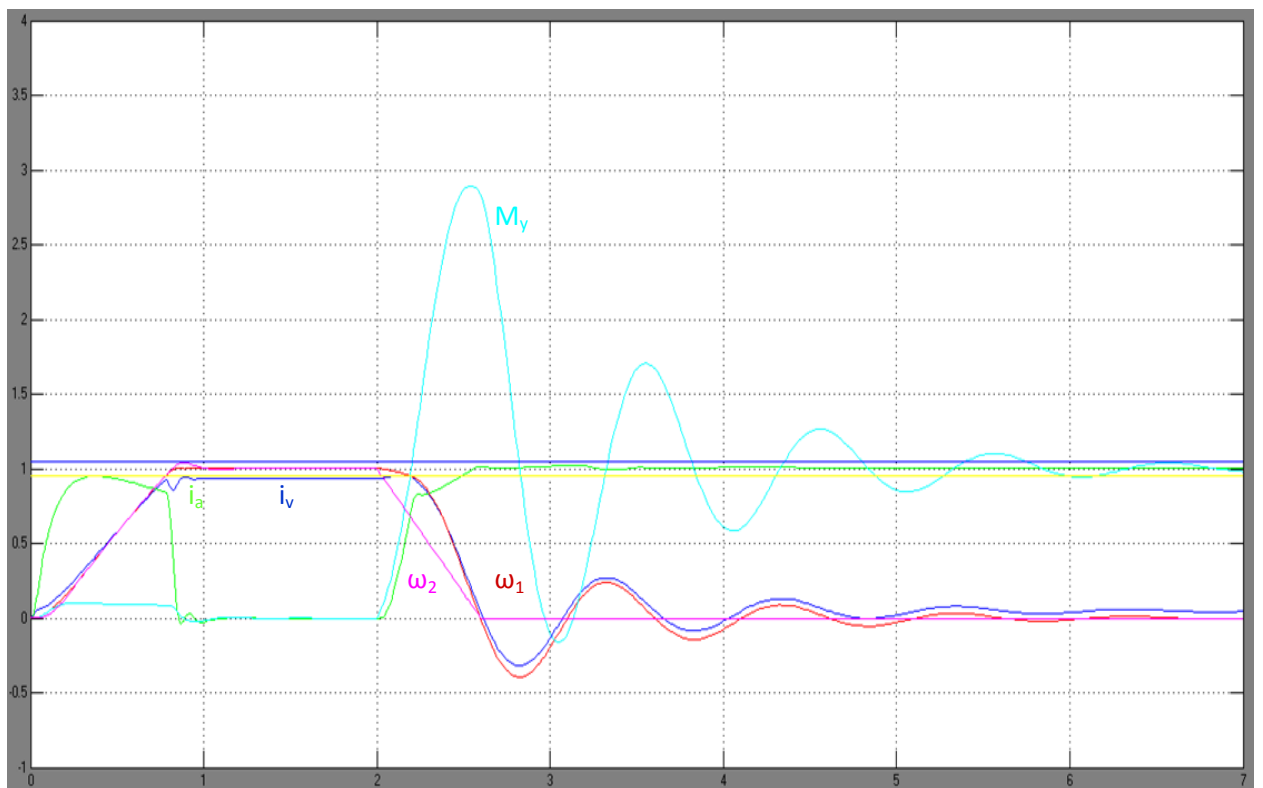


Рисунок Г.6 – Осциллограммы переходных процессов при $T_{\text{стоп}} = 0,6 \text{ с}$

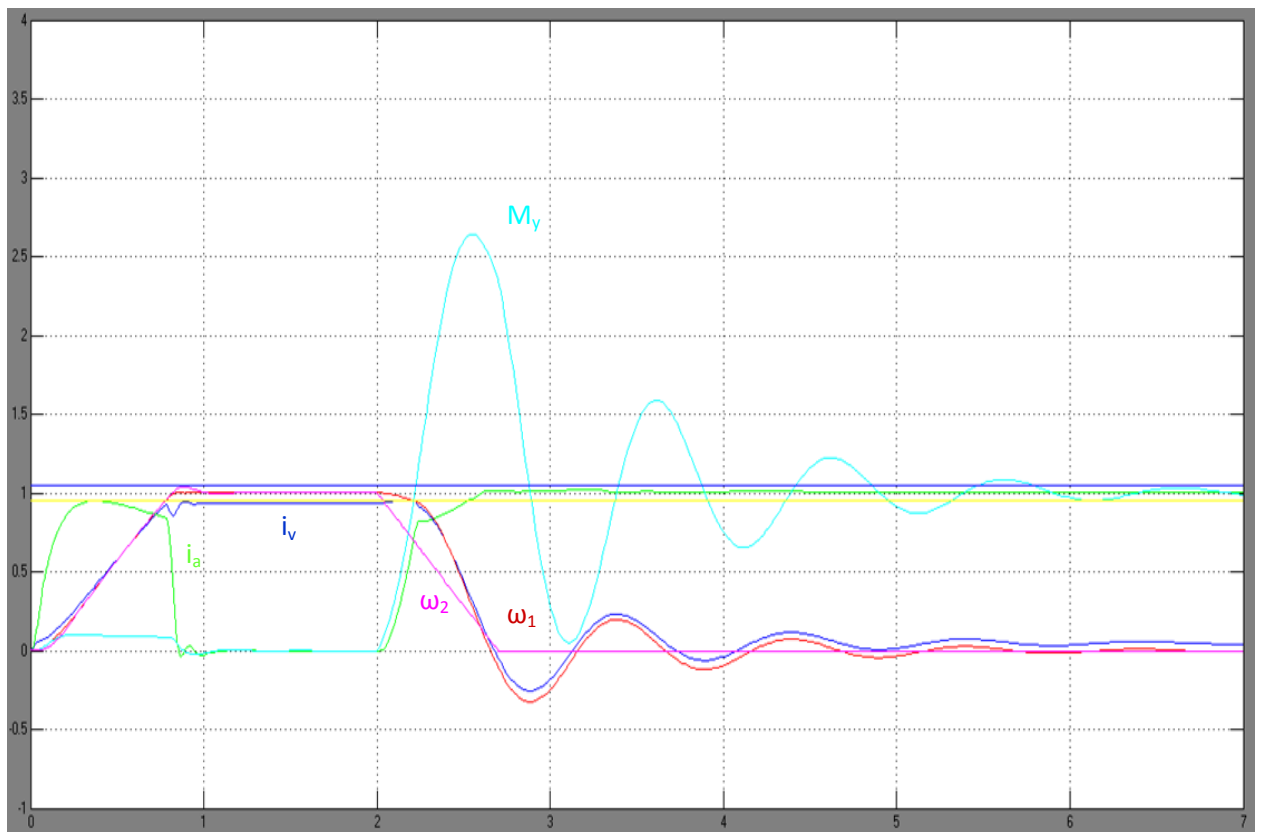


Рисунок Г.7 – Осциллограммы переходных процессов при $T_{\text{стоп}} = 0,7$ с

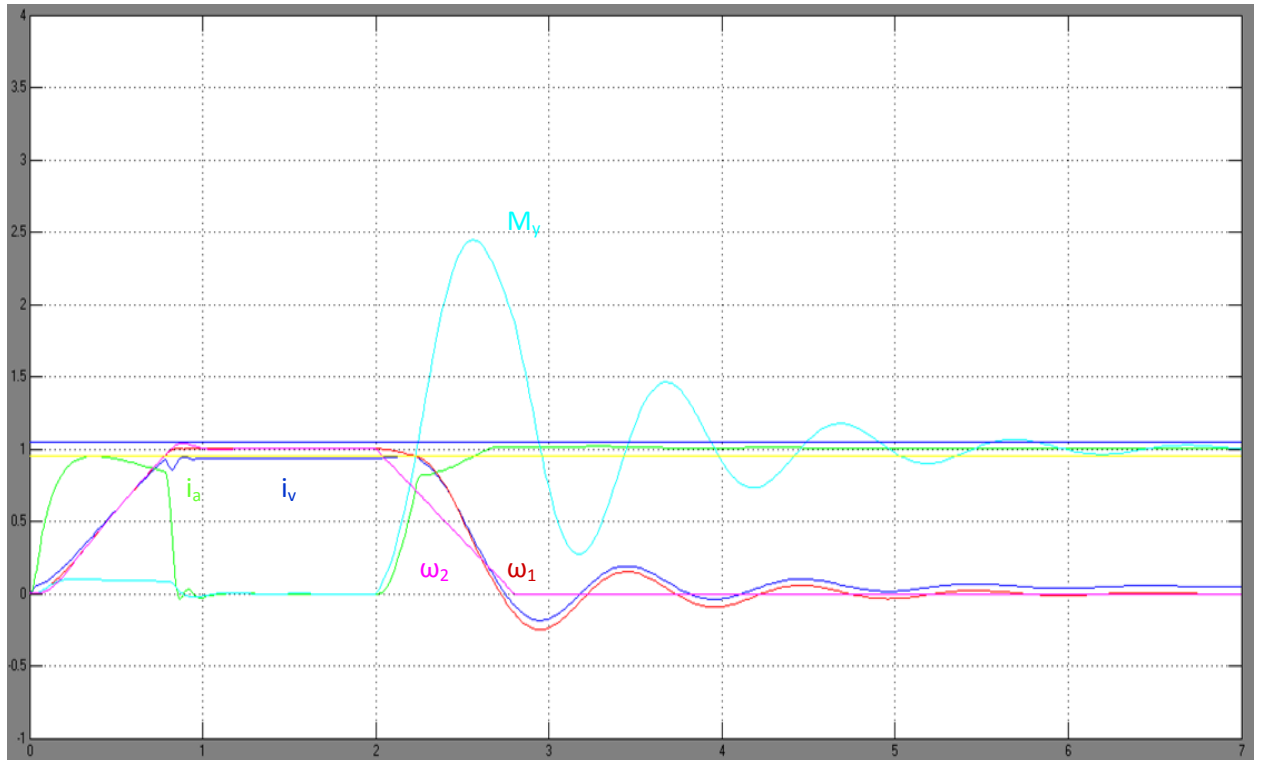


Рисунок Г.8 – Осциллограммы переходных процессов при $T_{\text{стоп}} = 0,8$ с

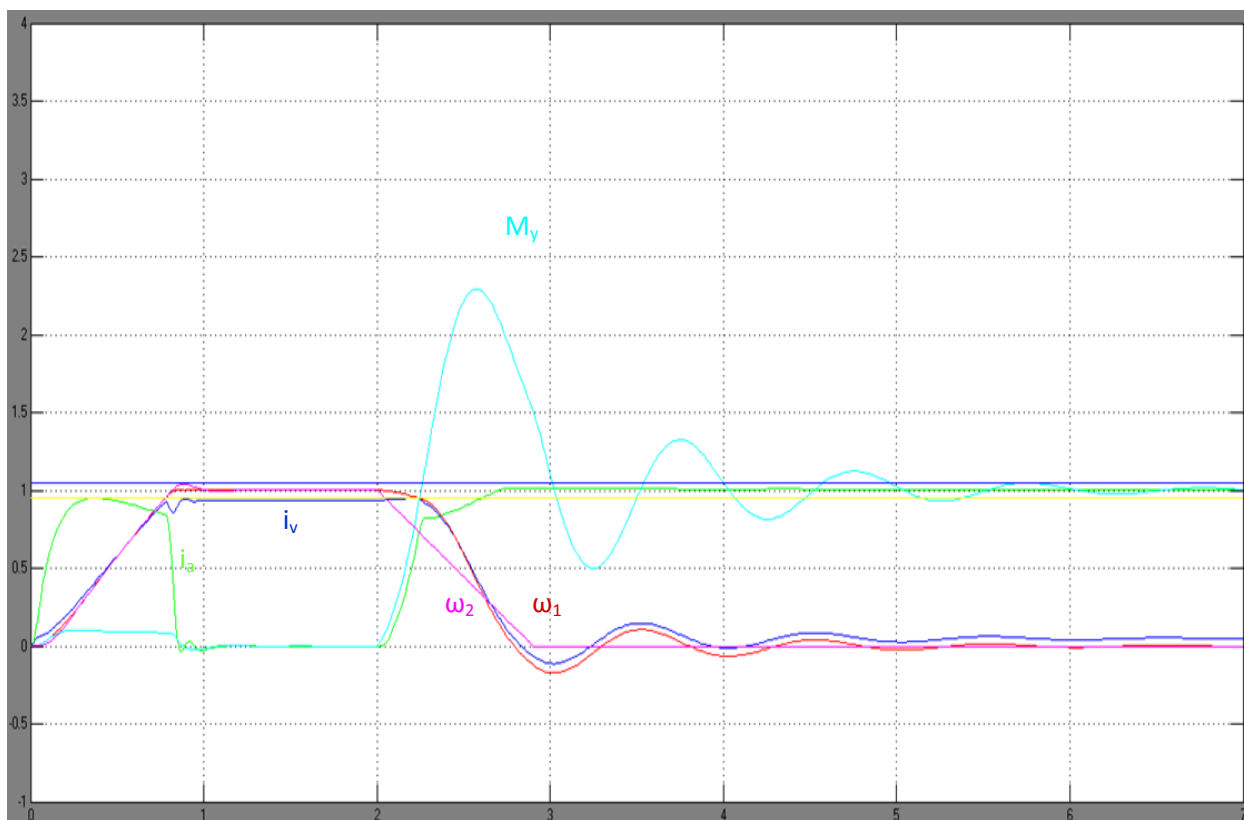


Рисунок Г.9 – Осциллограммы переходных процессов при $T_{\text{стоп}} = 0,9 \text{ с}$

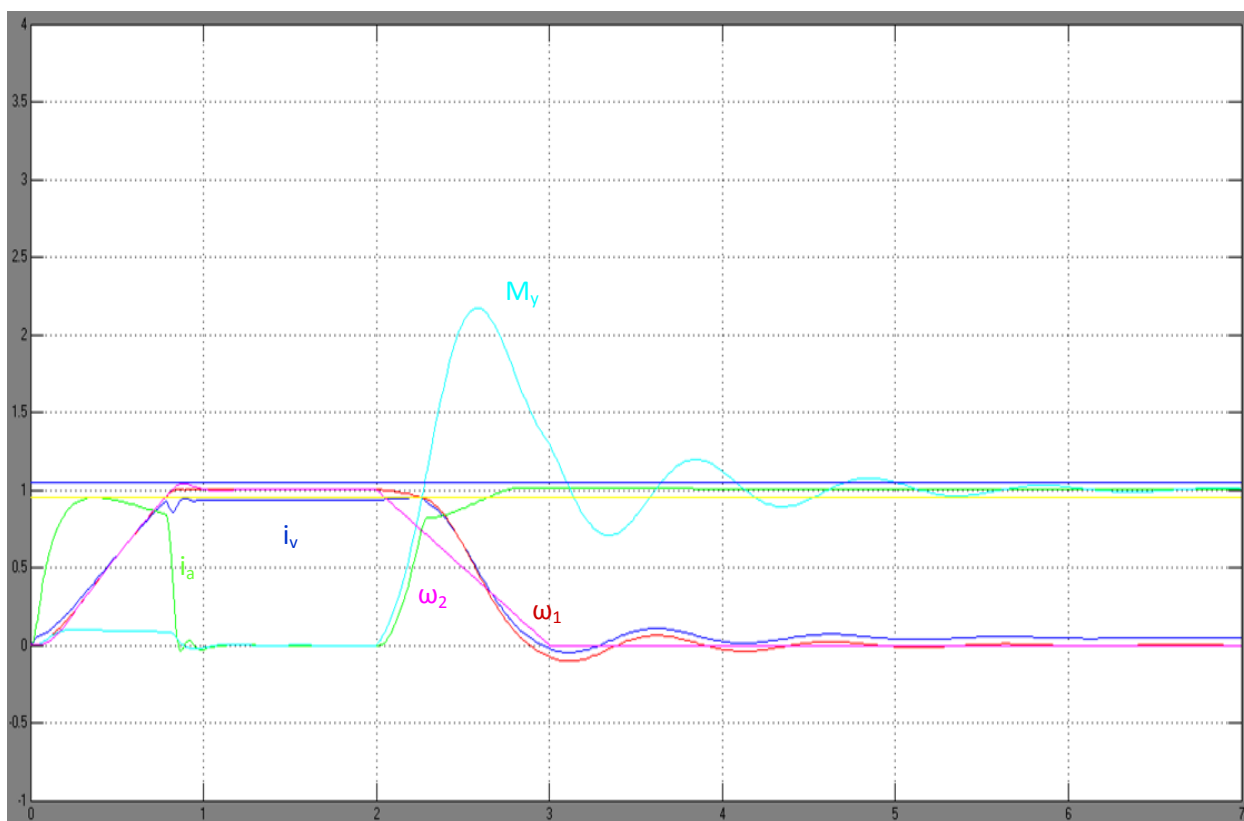


Рисунок Г.10 – Осциллограммы переходных процессов при $T_{\text{стоп}} = 1 \text{ с}$

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

Осциллограммы переходных процессов электромеханической системы с трехконтурной системой подчиненного регулирования

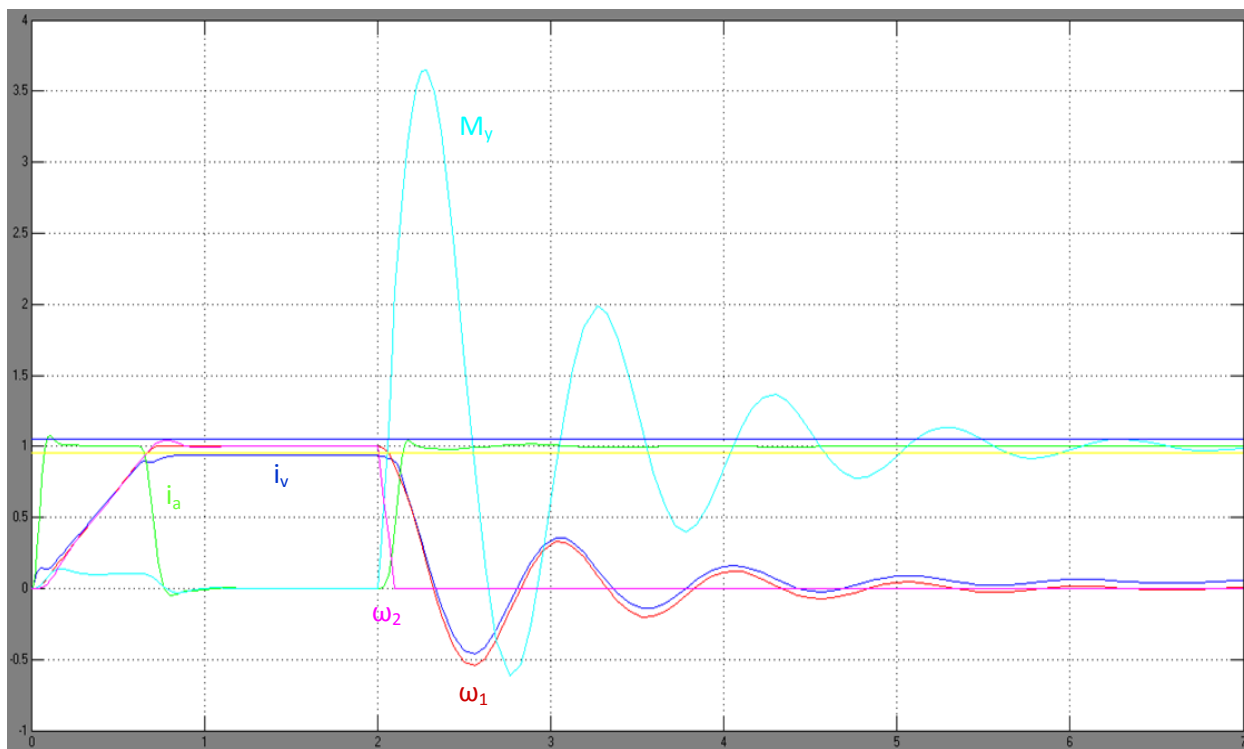


Рисунок Д.1 – Осциллограммы переходных процессов при $T_{\text{стоп}} = 0,1$ с

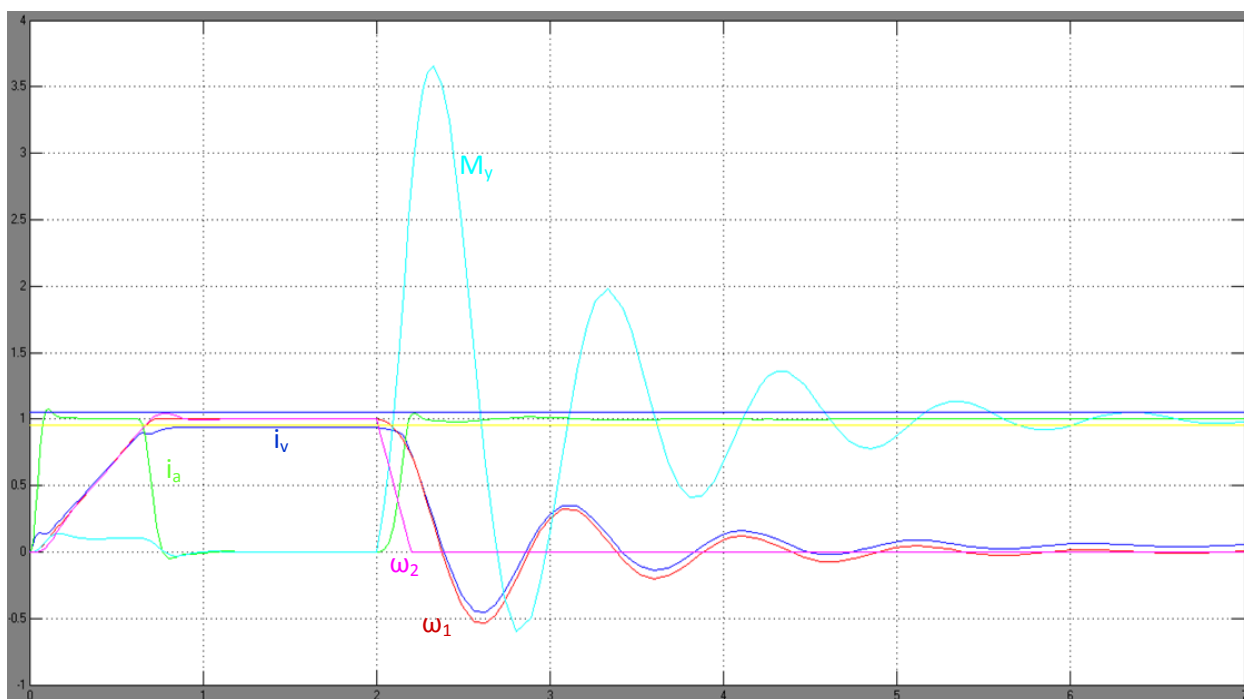


Рисунок Д.2 – Осциллограммы переходных процессов при $T_{\text{стоп}} = 0,2$ с

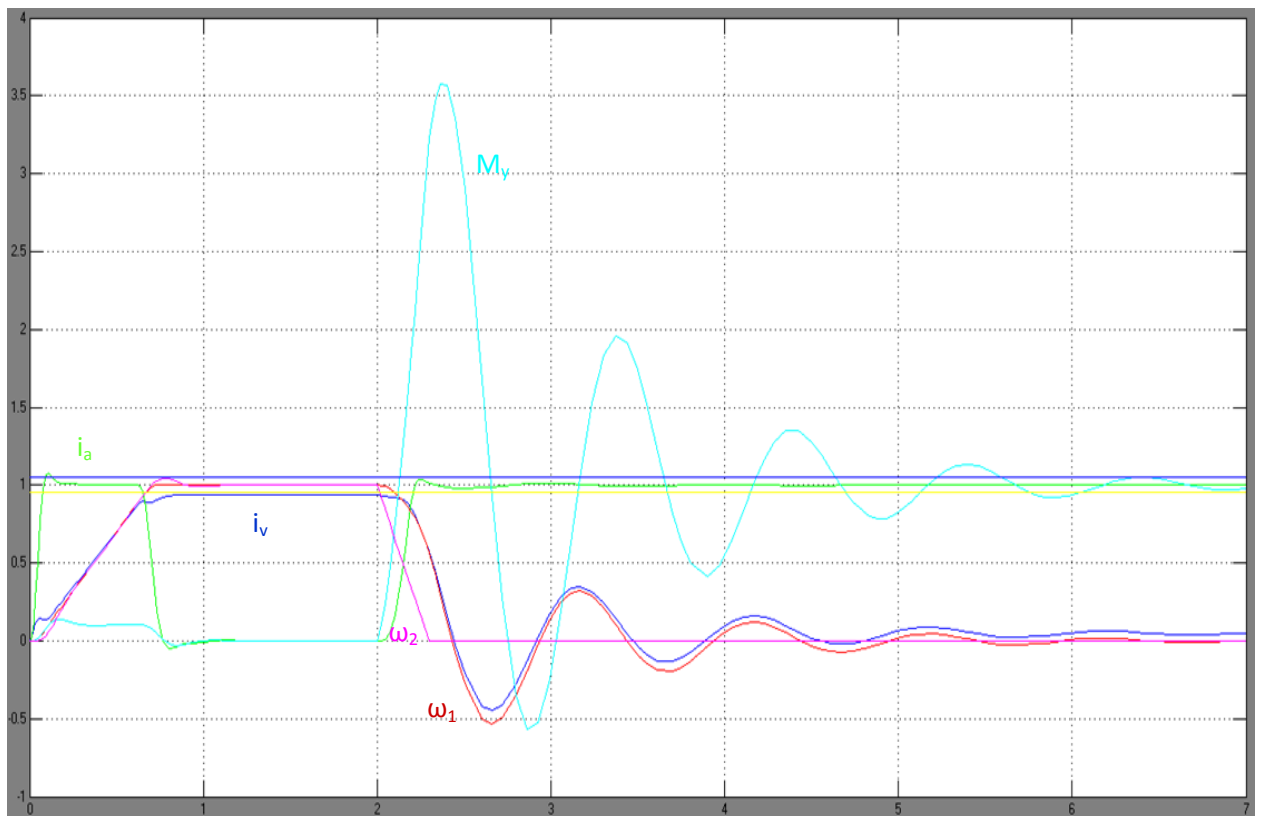


Рисунок Д.3 – Осциллограммы переходных процессов при $T_{\text{стоп}} = 0,3$ с

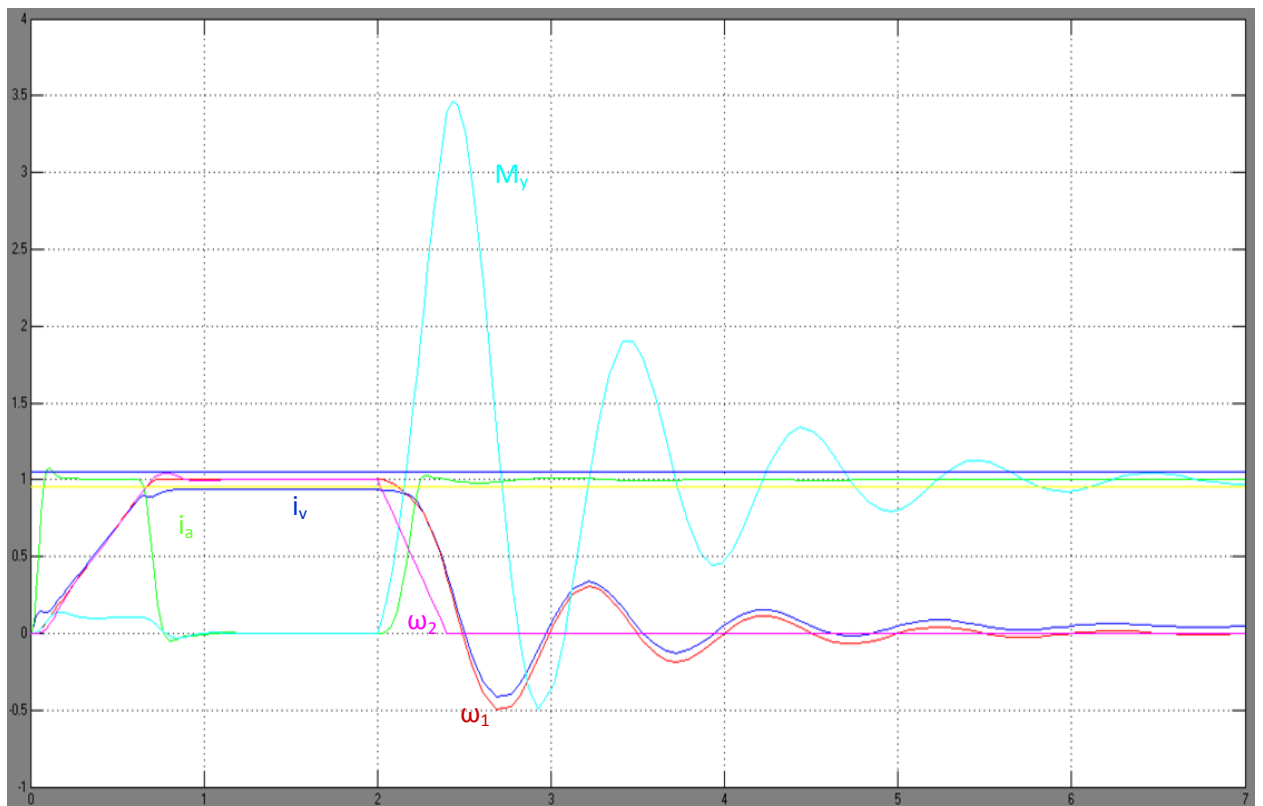


Рисунок Д.4 – Осциллограммы переходных процессов при $T_{\text{стоп}} = 0,4$ с

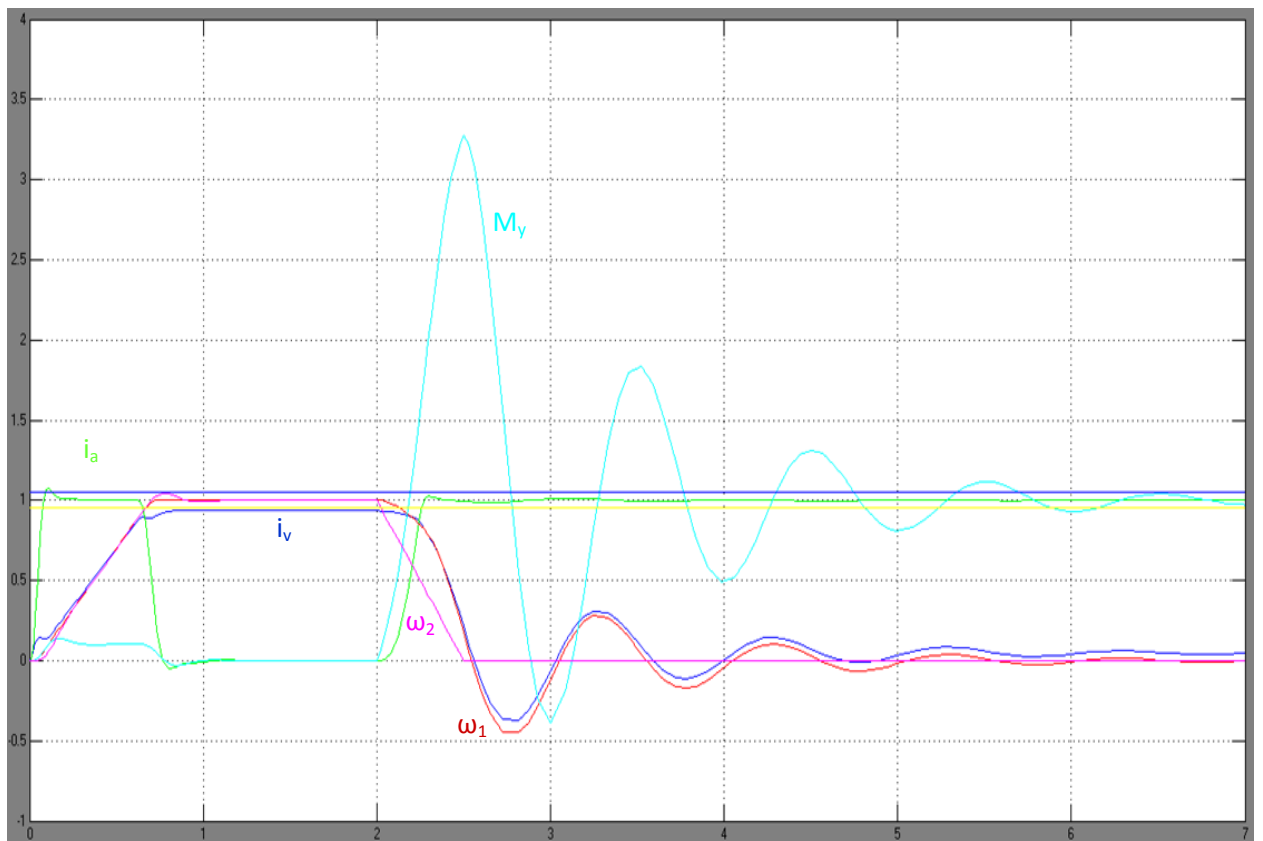


Рисунок Д.5 – Осциллограммы переходных процессов при $T_{\text{стоп}} = 0,5 \text{ с}$

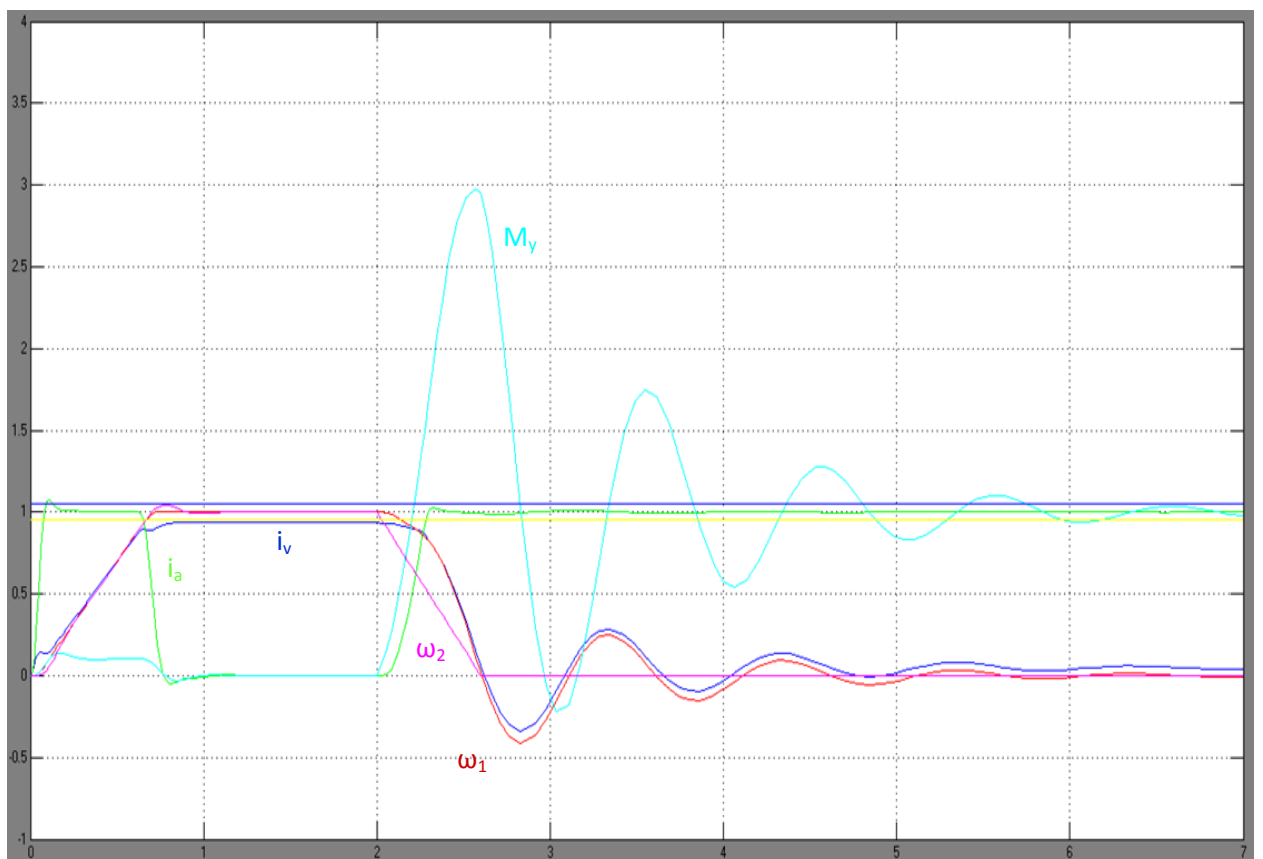


Рисунок Д.6 – Осциллограммы переходных процессов при $T_{\text{стоп}} = 0,6 \text{ с}$

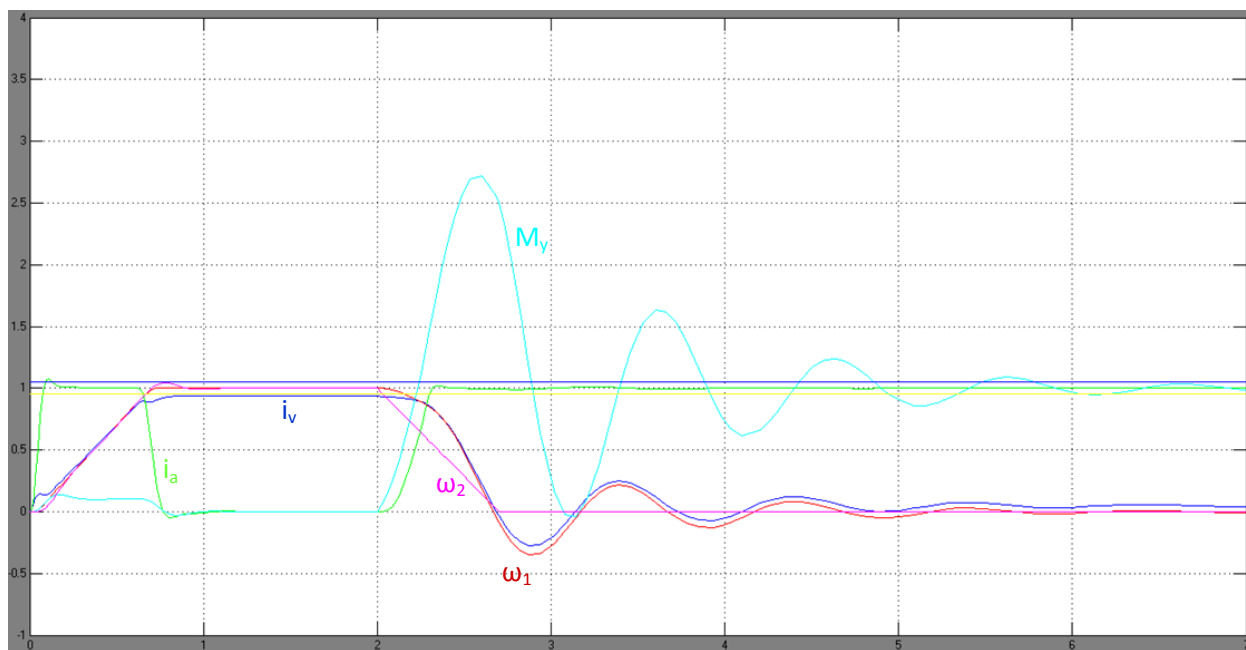


Рисунок Д.7 – Осциллограммы переходных процессов при $T_{\text{стоп}} = 0,7$ с

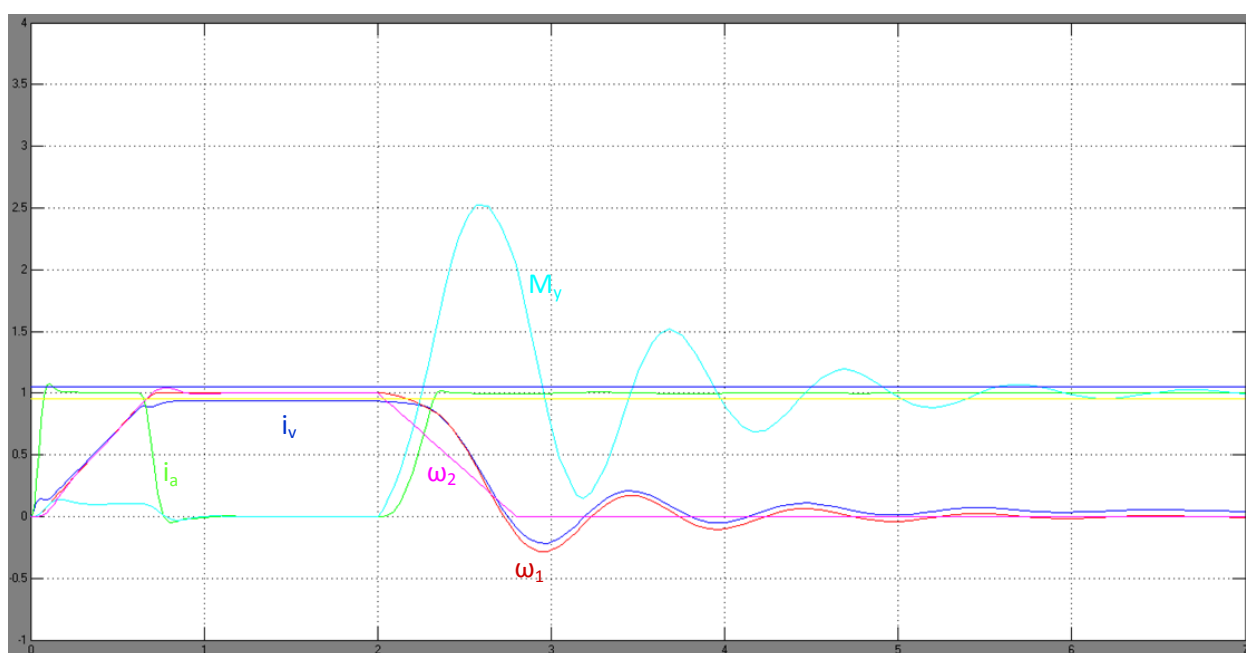


Рисунок Д.8 – Осциллограммы переходных процессов при $T_{\text{стоп}} = 0,8$ с

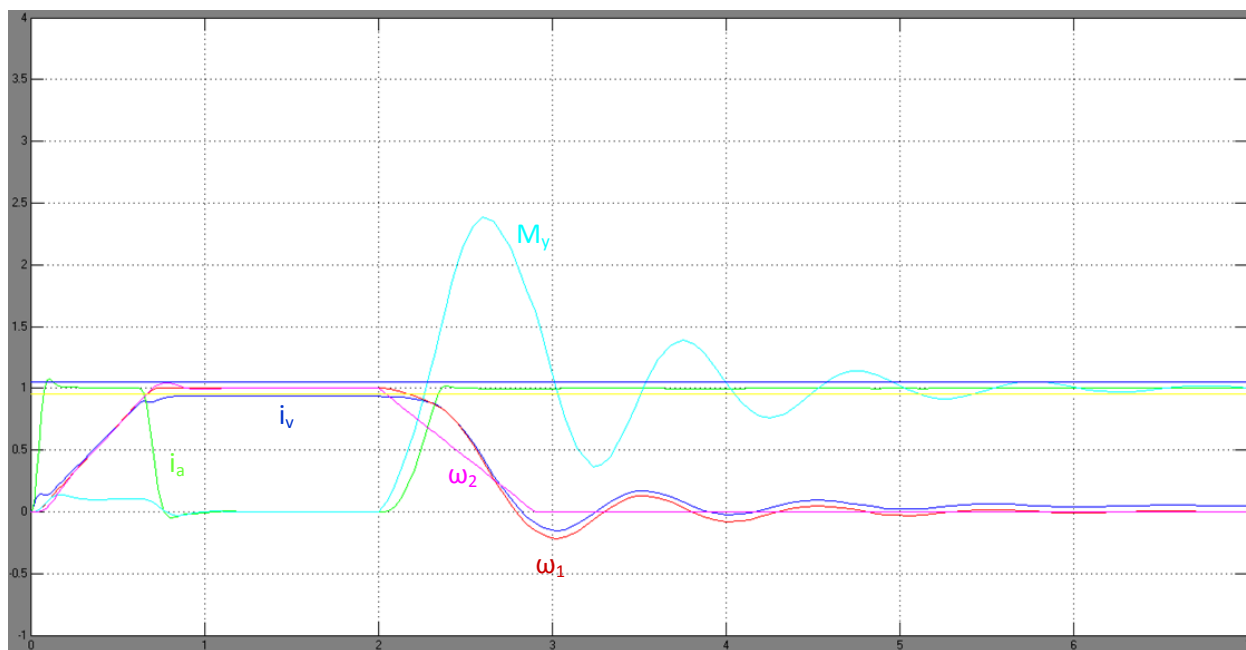


Рисунок Д.9 – Осциллограммы переходных процессов при $T_{\text{стоп}} = 0,9$ с

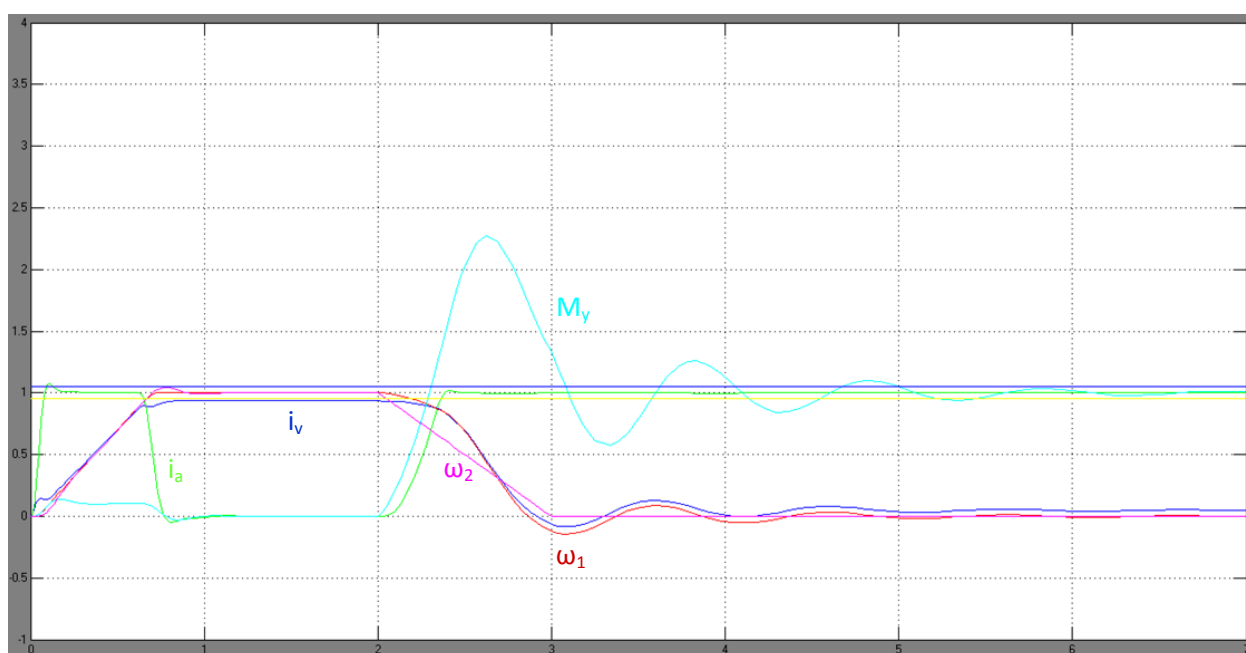


Рисунок Д.10 – Осциллограммы переходных процессов при $T_{\text{стоп}} = 1$ с

Бакалаврская работа выполнена мной самостоятельно. Используемые в работе материалы и концепции из опубликованной научной литературы и других источников имеют ссылки на них.

Отпечатано в 1 экземпляре.

Библиография 25 наименование.

« »
(дата)

(подпись)

Глухов В.В.
(ФИО)